

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA POTÊNCIA DAS ONDAS ABSORVIDA POR UM
DISPOSITIVO DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE INSTALADO NA COSTA SUL DO
BRASIL

por

Rodrigo da Cruz Lisboa

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, novembro, 2016

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA POTÊNCIA DAS ONDAS ABSORVIDA POR UM
DISPOSITIVO DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE INSTALADO NA COSTA SUL DO
BRASIL

Por

Rodrigo da Cruz Lisboa
BSc. Engenharia Civil Costeira e Portuária

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Costeira e Marítima

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Jeferson Avila Souza	PPGEO/FURG
Prof. Dr. Wiliam Correa Marques	PPGEO/FURG
Prof. Dr. Eric Didier	LNEC/Portugal

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 28 de novembro de 2016

AGRADECIMENTOS

À minha família, Adir, Eneida, Catia, Fernanda e Rafael, pelo amor, incentivo e apoio.

Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira pela dedicação, paciência e ensinamentos passados desde o início da minha jornada acadêmica.

Ao MSc. Fernando Torres pela ajuda com o modelo expedito.

Ao Dr. Eric Didier pela elaboração das UDFs utilizadas nesse trabalho e pela ajuda com o modelo Fluent.

Aos meus amigos e colegas de mestrado, André, João Paulo e Dante, pelo companheirismo, ajuda e momentos de descontração.

Aos meus amigos e colegas de laboratório, Pedro e Otávio, pelo convívio, apoio e sugestões.

À DHI pela licença do modelo Mike 21.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À FURG e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica pela formação de qualidade.

Enfim, à todos que, de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O aumento da demanda mundial por energias, associado à tendência de ampliação da utilização de fontes energéticas renováveis faz com que pesquisadores e engenheiros voltem as suas atenções para a energia contida nas ondas do mar. Embora estudos globais indiquem um grande potencial energético das ondas em várias regiões costeiras do mundo, para a otimização do desempenho de conversores de energia das ondas, é necessária a avaliação e caracterização detalhada do potencial energético no local de instalação do equipamento. Inserido nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo a avaliação numérica da potência das ondas absorvida por um dispositivo do tipo coluna de água oscilante instalada na costa sul do Brasil. Para a determinação do potencial energético local, dez anos de ondas em águas profundas, obtidas através do modelo Wave Watch III, foram propagadas para a região de interesse através do modelo Mike 21 SW que foi aferido e validado. Resultados mostraram que o fluxo de energia em águas profundas (80 m) é de 22.3 kW/m e em águas intermediárias (14 m) esse fluxo é diminuído para 6.7 kW/m. A refração e a dissipação por atrito com o fundo são as causas para a atenuação do fluxo de energia. Além disso, foi verificada uma variabilidade do fluxo de energia moderada em águas profundas e alta em águas intermediárias. Entretanto, os custos de construção, operação e manutenção de conversores de energia das ondas são significativamente menores em águas intermediárias comparado aos mesmos em águas profundas. Com isso, estudos de viabilidade levando em conta a possibilidade de instalação de conversores em águas intermediárias são justificáveis, principalmente para os casos de estruturas mistas com duplo objetivo: abrigo e geração de energia. Para a avaliação numérica da potência gerada por uma coluna de água oscilante, na região sul do Brasil, acoplada num quebra-mar, na profundidade de 14 m, utilizou-se o modelo Fluent. Com o objetivo de otimizar o conversor de energia ondas, foi determinado o tamanho ótimo da turbina do tipo Wells e foram implementados sistemas de controle de pressão na câmara e de rotação da turbina para que o equipamento opere na máxima geração de energia possível. Para a característica ondulatória local, o diâmetro da turbina ótima foi de 2,25 m e a potência mecânica gerada por unidade de CAO foi de 36,48 kW. Nessa situação, o equipamento opera com eficiência média de 54,45 %. Entretanto, verificou-se que a eficiência é variável de acordo com as características das ondas incidentes. Mostrando a importância da otimização do equipamento levando em conta as características ondulatórias do local de implementação da coluna de água oscilante.

Palavras-chaves: Energia das ondas, coluna de água oscilante, simulação numérica.

ABSTRACT

The increasing global demand for energies and the trend of using renewable sources of energy encourage researches and scientists to investigate the energy carried by ocean waves. Global studies show high wave energy potential in many parts of the world, however, to optimize wave energy converters, it is necessary the detailed evaluation and characterization of the wave energy where the converters will be installed. In this context, the objective of this study is to evaluate the wave energy generation by an oscillating water column installed in the south of Brazil. A ten-year hindcast of wave energy potential in the south of Brazil was carried out and wave characteristics offshore obtained from the model Wave Watch III were propagated to the interest region by the model Mike 21 SW that was calibrated and validated. Results showed a wave energy flux of 22.3 kW/m offshore (80 m) and, nearshore (14 m), the wave energy flux was diminished to 6.7 kW/m. Refraction and bottom friction dissipation are the reasons for the wave energy flux attenuation. Moreover, the variability of the wave energy flux is moderate in offshore and high in nearshore. Nevertheless, the costs of construction, operation and maintenance of wave energy converters are significantly lower in nearshore than offshore. Thereby, viability studies taking into account the possibility of the wave energy converters installation in nearshore is still justified, especially for multifunctional structures such as a harbor or coastal protection equipped with a wave energy converter. The numerical evaluation of energy generation by ocean waves at an oscillating water column, localized in the south of Brazil, coupled with breakwater, situated at 14 m depth, was carried out by the Fluent model. In order to optimize the wave energy converter, the optimum Wells turbine diameter was defined considering control systems of rotational speed and pressure in the chamber. For the local wave characteristics, the optimum diameter obtained was 2.25 m and the output power of the turbine was 36.48 kW for that case, resulting in an efficiency of 54.15 %. However, the oscillating water column efficiency changes accordingly with the incident waves, showing the importance of optimizing the wave energy converter with the local wave characteristics.

Keywords: Wave energy, oscillating water column, numerical simulation.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	21
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
3.1. Geração e Propagação de Ondas	22
3.1.1. Teoria Linear de Airy	23
3.1.2. Teoria Espectral de Ondas.....	27
3.2. Modelos de Propagação e Geração de Ondas	32
3.2.1. Wave Watch III.....	33
3.2.2. Mike 21 SW	34
3.2.3. Fluent	35
3.3. Equipamentos Conversores de Energia das Ondas	37
3.3.1. Coluna de Água Oscilante.....	38
3.3.2. Corpos Oscilantes	39
3.3.3. Galgamento	40
3.4. Características da Região de Estudo	41
4. METODOLOGIA	43
4.1. Avaliação e Caracterização do Potencial Energético Local	43
4.1.1. Malha e Batimetria.....	43
4.1.2. Condições de Contorno e Forçantes.....	45
4.1.3. Características das Simulações	46
4.1.4. Aferição e Validação do Modelo Numérico	49
4.1.5. Avaliação e Caracterização do Potencial Energético	51
4.2. Determinação da Potência Gerada por uma CAO	52
4.2.1. Transformação das Ondas Espectrais em Monocromáticas	53
4.2.2. Geometria, Malha e Monitoramento	53
4.2.3. Condições de Contorno	55
4.2.4. Características das simulações	57
4.2.5. Modelagem da Turbina e dos Sistemas de Controle	59
4.2.6. Determinação do Diâmetro Ótimo e da Potência Gerada	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1. Aferição e Validação do Modelo Mike 21 SW.....	62
5.2. Avaliação e Caracterização do Potencial Energético	67

5.3. Determinação da Potência Gerada por uma CAO	72
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	84
7. TRABALHOS FUTUROS	87
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1– Distribuição aproximada de energia nos oceanos de acordo com o período da onda. (Fonte: Garrison (2009)).....	23
Figura 3.2 – Problema de valor de contorno (Fonte: Dean e Dalrymple(1991))......	24
Figura 3.3 – Campo de velocidades sob uma onda progressiva. (Fonte: Dean e Dalrymple(1991))	26
Figura 3.4 – Superfície observada, espectro de amplitude e espectro de fase.	28
Figura 3.5 – Características do estado ondulatório de acordo com a forma do espectro.....	29
Figura 3.6 – Espectros bidimensional e unidimensional com características de mar bimodal.....	31
Figura 3.7– Classificação dos equipamentos de extração de energia das ondas segundo o princípio de funcionamento (Fonte: Falcão (2010))......	38
Figura 3.8 - Princípio de funcionamento da CAO (Fonte: Falcão (2010)).	39
Figura 3.9 - Wavebob (a), Pelamis (b) AWS (c) e WaveRoller (d) (Fonte: Barreiro e Gil (2008)). ...	40
Figura 3.10 – Wave Dragon: esquema e princípio de funcionamento (Fonte: http://www.wavedragon.net).	41
Figura 3.11 – Localização da área de estudo	41
Figura 4.1 - Malha com as condições de contorno (a) e batimetria sobreposta na malha (b).....	44
Figura 4.2 – Rosas de ondas para a H_s (a) e T_p (b) em dez anos de análise (1997-2006) no ponto de coordenadas 33°00' S e 51°00' W.	46
Figura 4.3 – Rosa dos ventos para dez anos (1997 – 2006) (a) e comparação da velocidade e direção do vento em três pontos do domínio computacional (b).	47
Figura 4.4 – Localização dos pontos de medição (a) e dos pontos para análise detalhada do potencial energético em águas intermediárias (b).	51
Figura 4.5 – Esquema com a geometria, condições de contorno e posição das sondas de monitoramento para as simulações hidrodinâmicas e aerodinâmicas da CAO.	54
Figura 4.6 – Malha computacional e detalhes dos refinamentos no início do canal e ao redor da parede vertical da CAO para os casos das ondas incidentes com alturas $H = 0,5$ m e 1,0 m e período $T = 5$ s.	56
Figura 4.7 – Curvas de performance da turbina do tipo Wells instalada na planta de geração de energia de Pico (Falcão e Justino, 1999). (a) Parâmetro adimensional de pressão (Ψ) versus parâmetro adimensional de vazão mássica (Φ) e (b) parâmetro adimensional de pressão (Ψ) versus parâmetro adimensional de potência (Π).	60
Figura 5.1 – Análise estatística para a aferição do modelo.	62

Figura 5.2 – Comparação entre os valores simulados na Análise 3 de H_s , T_p e D_p e os medidos pelo ondógrafo direcional.	64
Figura 5.3 – Comparação entre os espectros de frequência característicos medidos e simulados. ...	64
Figura 5.4 – Comparação entre os valores dos parâmetros H_s , T_p e D_p simulados na Análise e os medidos pelo ADV.	66
Figura 5.5 – Diagramas de dispersão para H_s , T_p e D_p entre os anos de 1996 a 1999.	66
Figura 5.6 – Distribuição da potência média das ondas na região de interesse (a) e potência média mensal nos pontos selecionados (b) para dez anos de análise (1997 – 2006).....	68
Figura 5.7 – Histogramas direcionais do fluxo de energia médio anual para os pontos de SJN (a) e OFF (b).....	70
Figura 5.8 – Histogramas direcionais do fluxo de energia sazonais para os pontos de SJN (a) e OFF (b).....	70
Figura 5.9 – Diagramas de densidade de potência média anual para o ponto SJN (a) e OFF (b).	71
Figura 5.10 – Séries temporais de elevação de superfície livre nas sondas de monitoramento (a) S1 e (b) S2.	74
Figura 5.11 – Séries temporais de elevação de superfície livre nas sondas de monitoramento (a) S3, (b) S4, (c) S5 e (d) S6.....	75
Figura 5.12 – Série temporal de elevação de superfície livre na sonda de monitoramento S7.....	76
Figura 5.13 – Séries temporais de elevação de superfície livre nas sondas de monitoramento (a) S8, (b) S9 e (c) S10.....	77
Figura 5.14 – Magnitude da velocidade e linhas de corrente em dez instantes dentro de um período de ondas para o caso de incidência de ondas com $H = 1,5$ m e $T = 10$ s.	78
Figura 5.15 – Série temporal de pressão média na sonda de monitoramento S11.....	79
Figura 5.16 – Curvas de potência mecânica gerada pela CAO no caso de incidência de ondas com $H = 1,50$ m e $T = 10$ s, para diversos diâmetros (D) e velocidades de rotação (ω) – linha sólida sem o sistema de controle de pressão e linha tracejada com o sistema de controle de pressão.	79
Figura 5.17 – Potência mecânica média anual gerada pela CAO com diversos tamanhos de turbinas.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros, metodologias e coeficientes utilizados para as simulações no Mike 21 SW.	48
Tabela 4.2 – Análises realizadas para a aferição do Modelo Mike 21 SW.	49
Tabela 4.3 – Aferição do parâmetro dissipação por atrito.....	49
Tabela 4.4 – Parâmetros e metodologias utilizadas para as simulações com o modelo Fluent.	58
Tabela 5.1 – Avaliação da variabilidade da potência	69
Tabela 5.2 – Porcentagem de ocorrência da agitação ondulatória por faixa de H_s e T_e	72
Tabela 5.3 – Porcentagem de ocorrência da agitação ondulatória por faixa de H_{rms} e T_e	72
Tabela 5.4 – Porcentagem de potência por faixa de H_{rms} e T_e	73
Tabela 5.5 – Relações características da turbina (k_t) utilizadas nas simulações com Fluent.	73
Tabela 5.6 – Máximas potências mecânicas geradas pela CAO para diversos diâmetros de turbina e ondas incidentes e sua respectiva potência mecânica média anual.	81
Tabela 5.7 – Porcentagem de eficiência da CAO por faixa de H e T	82
Tabela 5.8 – Relação entre a potência mecânica gerada levando em conta os sistema de controle de pressão dentro da câmara e desconsiderando tal mecanismo.	83

LISTA DE SÍMBOLOS

Algarismos Romanos

a	Amplitude da onda [m]
\underline{a}	Amplitude da onda tratada como variável aleatória [m]
C	Celeridade [m/s]
$C_{1\varepsilon}$	Constante taxa de dissipação 1 do modelo de turbulência [-]
$C_{2\varepsilon}$	Constante taxa de dissipação 2 do modelo de turbulência [-]
$C_{3\varepsilon}$	Constante taxa de dissipação 3 do modelo de turbulência [-]
C_μ	Constante viscosidade turbulenta [-]
C_m	Fração volumétrica [-]
C_g	Velocidade de grupo [m/s]
COV	Coefficiente de variação [-]
D	Diâmetro da turbina [m]
D_w	Espectro direcional [m ² /radianos]
d	Diâmetro dos grãos de areia [mm]
D_p	Direção de pico [°]
D_s	Espalhamento direcional [°]
EC	Energia cinética da onda [J/m ²]
E	Energia de uma onda [J/m ²]
$E(f)$	Espectro de variância [m ² /Hz]
$E(f, \theta)$	Espectro bidimensional [m ² /Hz radianos]
EP	Energia potencial da onda [J/m ²]
F	Fluxo de energia [W/m]
f	Frequência [Hz]
f_p	Frequência de pico [Hz]

g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
G_b	Geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidades [-]
G_k	Geração de energia cinética turbulenta devido à flutuação [-]
H	Altura de onda [m]
H_s	Altura significativa [m]
H_{rms}	Altura quadrática média [m]
h	Profundidade [m]
K'	Relação entre a velocidade média da turbina e a perda de carga [-]
K	Relação entre os adimensionais de vazão mássica e de pressão [-]
K_N	Coefficiente de rugosidade de Nikuradse [-]
k	Energia Cinética Turbulenta [-]
k_t	Relação característica da turbina [Pa m ⁻³ s]
k_w	Número de onda [rad/m]
L	Comprimento de onda [m]
M	Número de repetições [-]
m	Momento espectral [-]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/s]
MV	Variabilidade Mensal [-]
N	Índice de espalhamento direcional [-]
n	Tamanho da amostra
o	Valor obtido através de observação [-]
\bar{o}	Média dos valores obtidos através de observações [-]
p	Pressão [Pa]
p_0	Pressão atmosférica [Pa]
$P_{M \max}$	Maior fluxo de energia entre os meses analisados [W/m]
$P_{M \min}$	Menor fluxo de energia entre os meses analisados [W/m]

$P_{S_{\max}}$	Maior fluxo de energia entre as estações analisadas [W/m]
$P_{S_{\min}}$	Menor fluxo de energia entre as estações analisadas [W/m]
P_t	Potência mecânica da turbina [W/m]
P_{year}	Fluxo de energia médio anual [W/m]
s	Valor obtido na simulação [-]
S	Termo fonte e sumidouro de energia [-]
SV	Variabilidade Sazonal [-]
sd	Desvio padrão [-]
SI	<i>Scatter Index</i> [-]
T	Período da onda [s]
Tm	Período médio [s]
Te	Período de energia [s]
Tp	Período de pico [s]
u	Componente horizontal de velocidade [m/s]
\bar{u}	Velocidade média [m/s]
u'	Flutuação da velocidade [m/s]
U_r	Velocidade de correção no batedor [m/s]
Vr	Viés relativo [-]
w	Componente vertical de velocidade [m/s]
x	Coordenada horizontal [m]
y	Coordenada horizontal [m]
z	Coordenada vertical [m]
$z_{Charnock}$	Parâmetro de Charnock [-]

Símbolos Gregos

α	Fase da onda [radianos]
α_p	Constante de Philips
$\Delta\theta$	Espalhamento direcional [°]
Δf	Espaçamento da frequência [Hz]
ε	Taxa de dissipação da turbulência [-]
Φ	Parâmetro adimensional de vazão mássica [-]
γ	Fator de aprimoramento de pico [-]
η	Elevação/posição da superfície livre [m]
η_{alvo}	Elevação/posição da superfície livre alvo [m]
η_m	Elevação/posição da superfície livre medida na frente do batedor [m]
η_r	Elevação/posição da superfície livre refletida [m]
Π	Parâmetro adimensional de potência [-]
μ	Viscosidade [N s/m ²]
μ_t	Viscosidade turbulenta [N s/m ²]
$\bar{\mu}$	Média [-]
θ	Direção [°]
θ_m	Direção média [°]
ρ	Massa específica do fluido [kg/m ³]
ρ_*	Massa específica de referência [kg/m ³]
σ	Frequência angular [radianos/s]
σ_ε	Número de Prandtl para ε
σ_k	Número de Prandtl para k
σ_S	Parâmetro definidor da forma do espectro [-]
φ	Potencial de velocidades [m ² /s ²]
Ψ	Parâmetro adimensional de pressão [-]

ω Velocidade de rotação da turbina [rad/s]

Super Índices e Sub Índices

bd Referente à rebentação induzida pela profundidade

bot Referente à dissipação por atrito no fundo

ds Referente à dissipação por *whitecapping*

E Referente à teoria espectral

i Referente à um valor *i*

in Referente à geração de ondas pelo vento

j Referente à um valor *j*

L Referente à teoria linear

n Enésimo

nl Referente às interações não lineares

x Referente à *x*

y Referente à *y*

θ Referente à θ

σ Referente à σ

50 Mediano

LISTA DE ABREVIATURAS

ADV	<i>Acoustic Doppler Velocimeter</i>
AWS	<i>Archimedes Wave Spring</i>
CAO	Coluna de Água Oscilante
CAS	Cassino
CFL	<i>Courant-Friedrichs-Lewy</i>
CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
DIA	<i>Discretion Interaction Approximate</i>
DHI	<i>Danish Hydraulic Institute</i>
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil
E	Este
ENE	Este-Nordeste
FS	Fator de Segunça
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
JONSWAP	<i>Join North Sea Wave Project</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Lisboa/Portugal
NCEP	<i>National Center for Environmental Predictions</i>
NE	Nordeste
MUSCL	<i>Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservations Laws</i>
NOAA	<i>National Oceanographic and Atmospheric Administration</i>
OFF	Offshore
PPGEO	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
PRESTO!	<i>PREssure STaggering Option</i>
QUE	Querência
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier Stokes</i>
S	Sul
SBS	<i>Southern Brazilian Shelf</i> – Plataforma Continental do Sul
SIMPLEC	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations - Consistent</i>
SJN	São José do Norte
SSE	Sul-Sudeste
SW	Sudoeste
UDF	<i>User Defined Fuction</i>

VOF	<i>Volume of Fluid</i>
W	Oeste
WS	<i>Wind speed</i>
WD	<i>Wind direction</i>
WECs	<i>Wave Energy Converters</i> – Conversores de Energia das Ondas
WRD	Ondógrafo direcional
WWIII	<i>Wave Watch III</i>

1. INTRODUÇÃO

As ondas geradas pelo vento se encontram na faixa de período de 0,5 s a 30 s e são as que transportam mais energia nos oceanos. Na zona de geração, as ondas possuem uma grande variabilidade de alturas, períodos e direções. À medida que tais ondas se distanciam do local onde foram geradas, há uma tendência de organização em grupos de períodos e direções semelhantes, devido ao processo dispersivo. Em águas profundas, as ondas podem se propagar por longas distâncias com pequenas atenuações. Já em águas intermediárias e/ou rasas, elas sofrem uma série de transformações na sua altura, forma e direção. Tais transformações são dadas por processos conservativos ou não conservativos sofridos pela interação da onda com o fundo marinho.

Dentre os recursos energéticos disponíveis nos oceanos, a energia transportada pelas ondas geradas pelo vento é a que apresenta maiores densidades energéticas. O potencial energético global das ondas está entorno de 32 TW/ano (Mørk et al., 2010) e, junto a linha de costa, negligenciando as ilhas e os polos, chega a valores superiores a 2 TW/ano (Gunn e Stock-Williams, 2012). O grande recurso energético disponível, aliado ao aumento pela demanda por energias renováveis, tem atraído o interesse de pesquisadores e engenheiros em desenvolver tecnologias capazes de extrair parte da energia proveniente desse tipo de ondas.

Nas últimas décadas, duas vertentes de trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de captar a energia proveniente das ondas: a primeira dedicada ao desenvolvimento, projeto e experimentação de conversores de energia das ondas (*Wave Energy Converters* – WECs) (por exemplo: Clément et al., 2002; Falcão, 2010; Teixeira et al., 2013; López et al., 2014; López et al., 2015; López et al., 2016; Torres et al., 2016) e a segunda voltada à avaliação e caracterização da energia das ondas disponíveis em certas regiões costeiras com o objetivo de fornecer informações detalhadas para desenvolvedores WECs (por exemplo: Veigas et al., 2014; Appendini et al., 2015; Guillou, 2015; Alonso et. al., 2015; Besio et. al., 2016).

Na costa brasileira, o fluxo energético médio anual em águas profundas é de 5 kW/m a 20 kW/m de frente de onda, sendo que a região sul é a que apresenta os maiores fluxos de energia (Mørk et al., 2010). Porém, em águas intermediárias e rasas, não existe uma avaliação e caracterização do potencial energético das ondas no Brasil. Além do mais, nas análises de otimização de WECs, em sua maioria, não é levado em conta às características da agitação ondulatória local. Com isso a otimização dos equipamentos fica atrelada a uma condição ondulatória hipotética que na maioria das vezes destoa da real.

Inserido nesse contexto, este trabalho visa quantificar a energia absorvida por um dispositivo

de coluna de água oscilante (CAO) localizada na região costeira do sul do Brasil e instalada em um quebra-mar na profundidade de 14 m. Para isso, os dados de ondas obtidos através do *Wave Watch III* (WWIII) em águas profundas são impostos como condições de contorno para a propagação das ondas até a costa pelo modelo espectral de terceira geração Mike 21 SW, desenvolvido pela *Danish Hydraulic Institute* (DHI). O desempenho da CAO é analisado através do modelo Fluent, desenvolvido pela ANSYS, com as ondas características presentes na região.

A aferição do modelo Mike 21 SW é realizada através da comparação dos valores simulados com os medidos por um ondógrafo direcional e um *acoustic doppler velocimeter* (ADV) fixados nas profundidades de 25 m e 12 m durante os meses de maio, junho e julho de 2005 (Holland et al., 2009). Para a validação do modelo, compararam-se os valores simulados com medições obtidas por um ondógrafo direcional fundeado na profundidade de 15 m entre os anos de 1996 a 1999 (Strauch et al., 2009).

A seguir, são reconstituídos 10 anos de agitação ondulatória (1997-2006) para a avaliação e caracterização do potencial energético na região, com destaque em três pontos localizados na isobatimétrica de 14 m de profundidade, adequados para extração de energia pelo uso de dispositivos do tipo CAO acoplados em quebra-mares e compararam-se os valores e as características do potencial energético nessa profundidade com o disponível em águas profundas.

Para determinar a real potência gerada por uma CAO, instalada na região costeira do sul do Brasil acoplada em quebra-mares, às condições ondulatórias locais determinadas através da reconstituição da agitação ondulatória são impostas no modelo Fluent. Com o objetivo de manter a CAO em condições ótimas de geração de energia, são considerados sistemas de controle de pressão dentro da câmara e de rotação da turbina, conforme metodologia descrita por Torres et al., (2016). Através de um método numérico simplificado, desenvolvido por Torres (2015), é determinado o tamanho ótimo da turbina do tipo Wells para a câmara predefinida e para as condições ondulatórias local.

2. OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo geral avaliar e caracterizar o potencial energético das ondas no sul do Brasil e a real potência absorvida por uma CAO, caso fosse instalada nessa região. Entretanto, para alcançar o objetivo geral do trabalho com êxito, alguns objetivos específicos terão que ser atingidos, sendo eles:

- Adquirir, organizar e analisar os dados de ondas e de ventos reanalisados de dez anos (1997-2006) em águas profundas obtidos com o WWIII e disponíveis através da base de dados global da *National Oceanographic and Atmospheric Administration* (NOAA).
- Aferir e validar o modelo de escala regional Mike 21 SW através da comparação de valores simulados com valores medidos em campanhas de medição de curto e longo período.
- Reconstituir dez anos (1997-2006) da agitação ondulatória local com o modelo Mike 21 SW aferido e validado.
- Avaliar e caracterizar o clima de ondas local, assim como o potencial energético das ondas disponível na costa sul do Brasil.
- Transformar as ondas espectrais obtidas, através da reconstituição ondulatória na isobatimétrica de 14 m, para ondas monocromáticas de potência equivalente.
- Determinar o tamanho ótimo da turbina do tipo Wells para a condição ondulatória monocromática incidente.
- Determinar a real potência gerada por uma CAO fixada na costa sul do Brasil acoplada em um quebra-mar, com sistemas de controle de pressão dentro da câmara e rotação da turbina.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo, será descrita de forma básica e sucinta a fundamentação teórica para o desenvolvimento desse trabalho. Primeiramente, serão discutidos aspectos relacionados à geração, à propagação e às transformações de ondas, assim como a teoria linear e a espectral. A seguir, serão mencionados alguns aspectos da simulação numérica de propagação e geração de ondas. Posteriormente, será feita uma breve descrição das tecnologias existentes para a extração de energia das ondas com o enfoque para a CAO. Por fim, serão mostradas as características da região em estudo.

3.1. Geração e Propagação de Ondas

As ondas em um corpo de água aberto para a atmosfera são uma manifestação de forças agindo no fluido que tendem a deformá-lo. Estas forças que agem contra as ações da gravidade e da tensão superficial que, por sua vez, atuam juntas para manter um nível de superfície livre (Dean e Dalrymple, 1991). As forças que deformam o fluido podem ser causadas por ventos, terremotos, atração gravitacional, etc. Depois de geradas, a força gravitacional e a tensão superficial são as forças restauradoras que permitem as ondas se propagarem.

As ondas podem ser classificadas através da sua força geradora, força restauradora e frequência/período (Garrison, 2009). Na Figura 3.1 é mostrada a distribuição de energia nos oceanos de acordo com o período da onda. As ondas geradas pelo vento, que se encontram entre os períodos de 0,5 s a 30 s, possuem como força restauradora a gravidade. Nota-se, também, que é a principal forma de transporte de energia nos oceanos. Para evitar redundância, a partir desse ponto, as ondas geradas pelo vento serão denominadas apenas pela palavra onda.

A altura, período e direção das ondas dependem basicamente da intensidade, duração e pista de atuação do vento. Na zona de geração, as ondas possuem uma grande variação de alturas, períodos e direções. Ondas com essas características são denominadas vagas (*sea*). Uma vez geradas, as ondas são capazes de propagar-se por grandes distâncias, com pouca atenuação, mesmo depois de cessada a influência do vento (Melo F^o, 1993). Pelo processo dispersivo, à medida que as ondas se propagam, há uma organização das mesmas em períodos e direções semelhantes. Estas ondas com aspecto mais organizado são denominadas ondulações (*swell*).

Quando deixam de se propagar em águas profundas, as ondas sofrem uma série de transformações na sua forma, altura e direção. Essas transformações podem ser dadas por fenômenos conservativos (refração, empolamento, difração ou reflexão) ou por fenômenos não

conservativos (rebentação e dissipação por atrito com o fundo). Os fenômenos conservativos, como diz o nome, são transformações que as ondas sofrem onde a sua energia é mantida. Por outro lado, as transformações sofridas pelas ondas onde há um acréscimo ou decréscimo de energia são denominadas fenômenos não conservativos.

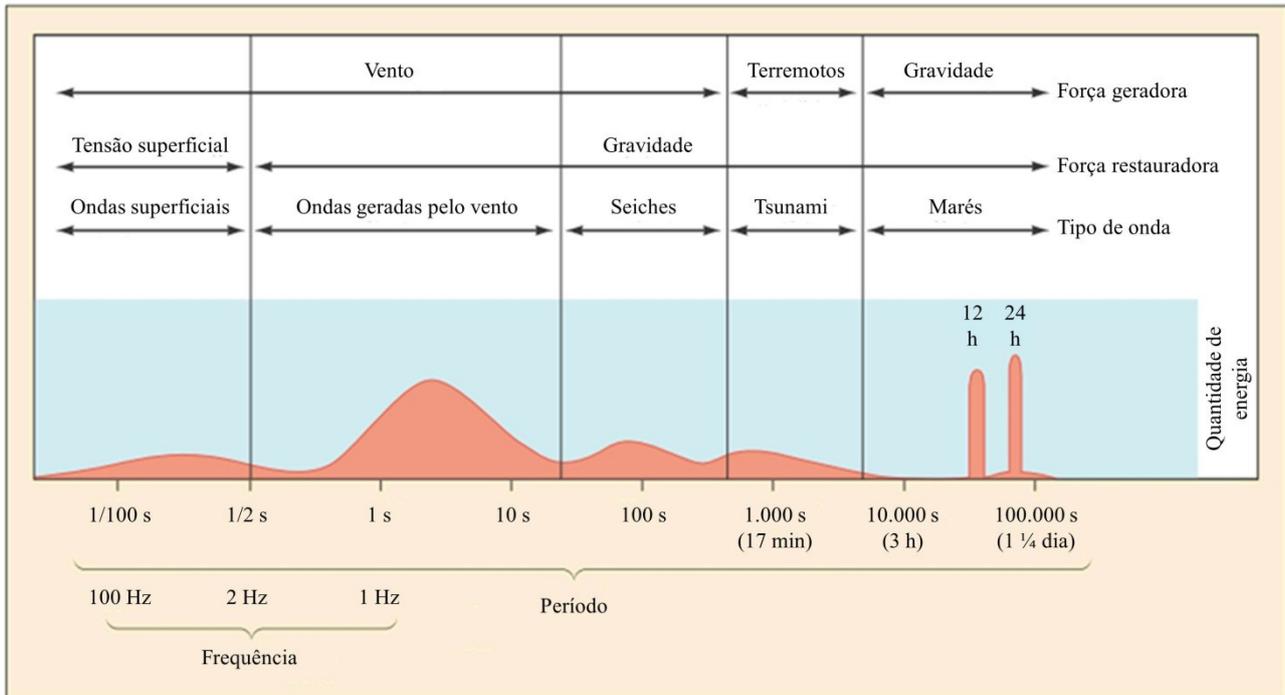


Figura 3.1– Distribuição aproximada de energia nos oceanos de acordo com o período da onda.

(Fonte: Garrison (2009))

3.1.1. Teoria Linear de Airy

Ondas reais propagam-se em fluidos viscosos, sobre fundos irregulares e porosos. Um fato marcante, porém, é que, na maioria dos casos, a principal porção do escoamento causado por ondas pode ser considerada irrotacional. Isto ocorre porque os efeitos viscosos estão concentrados apenas nas regiões próximas às superfícies de contato do fluido com a atmosfera e com o fundo (Dean e Dalrymple, 1991). Destarte, pode-se considerar o escoamento das ondas como invíscido e irrotacional. Sendo assim, existe uma solução potencial para tal escoamento, que obedece a equação de Laplace, Eq. 3.1, considerada para propagação de ondas em um canal, ou seja, escoamento bidimensional, para simplificação das equações.

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.1)$$

onde φ é o potencial de velocidades, x é a coordenada horizontal e z é a coordenada vertical. Foi

considerado ondas com pequena amplitude, monocromáticas e com dependência do potencial de velocidades com o tempo harmônica. Então, o modelo matemático torna-se um problema de valor de contorno em um domínio com o comprimento igual ao comprimento da onda, sendo necessária a imposição de condições de contorno nas fronteiras: condição de contorno cinemática de fundo, condições de contorno cinemática e dinâmica da superfície livre e condições de contorno de radiação nas superfícies laterais. Na Fig. 3.2 é mostrado o problema de valor de contorno.

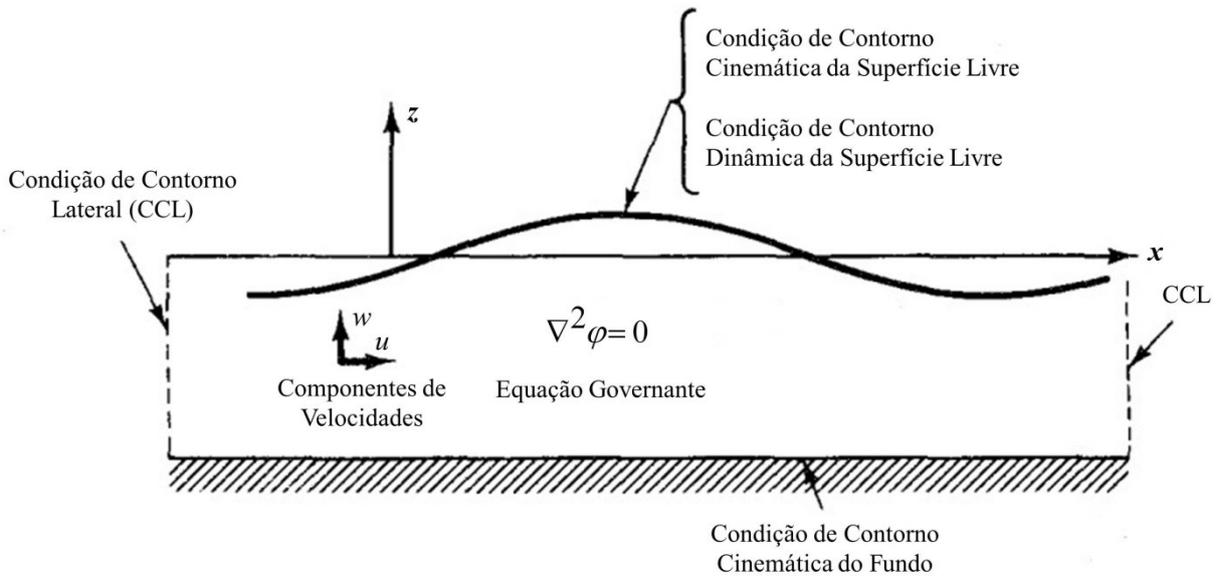


Figura 3.2 – Problema de valor de contorno (Fonte: Dean e Dalrymple(1991)).

Na condição de contorno de fundo foi imposta a simplificação de fundo estacionário, sem atrito e horizontal. Com isso, a velocidade vertical é nula no fundo (Eq. 3.2). A condição de contorno cinemática da superfície livre impõe a inexistência de escoamento através da mesma (Eq. 3.3). Para a condição de contorno dinâmica da superfície livre, utiliza-se a equação de Bernoulli assumindo-se a pressão atmosférica nula na posição da superfície livre, (Eq. 3.4). Por fim, foi aplicada a periodicidade no tempo e no espaço como condição de radiação, (Eq. 3.5).

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \text{ em } z = -h \quad (3.2)$$

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \text{ em } z = \eta \quad (3.3)$$

$$-\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] + g z = C(t) \text{ em } z = \eta \quad (3.4)$$

$$\varphi(x, z, t) = \varphi(x, z, t + T) \text{ e } \varphi(x, z, t) = \varphi(x + L, z, t) \quad (3.5)$$

onde u é a componente horizontal da velocidade, w é a componente vertical da velocidade, h é a profundidade, η é a posição da superfície livre, g é a aceleração da gravidade, T é o período da onda e L é o comprimento de onda. Integrando a equação governante (Eq. 3.1) e impondo as condições de contorno (Eq. 3.2 a Eq. 3.5), obtém-se a solução para o potencial de velocidades de uma onda progressiva (Eq. 3.6). Também é obtida a expressão da elevação de superfície livre (Eq. 3.7), que depende da altura da onda (H) e possui periodicidade no tempo e no espaço, e a relação dispersão (Eq. 3.8), relacionando a frequência angular ($\sigma = 2\pi T^{-1}$) com o número de onda ($k_w = 2\pi L^{-1}$). Esta última, pode ser vista como uma relação entre o comprimento de uma onda com seu período em uma determinada profundidade (h).

$$\varphi = -\frac{Hg}{2\sigma} \frac{\cosh[k_w(h+z)]}{\cosh(k_w h)} \cos(k_w x - \sigma t) \quad (3.6)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(k_w x - \sigma t) \quad (3.7)$$

$$\sigma^2 = g k_w \tanh(k_w h) \quad (3.8)$$

A celeridade, velocidade de propagação da onda, é definida como a divisão do comprimento da onda pelo seu período ($C = L/T = \sigma/k$). Substituindo a expressão da celeridade na Eq. 3.8, tem-se uma função que relaciona a velocidade de propagação da onda com seu comprimento (Eq. 3.9). Através dessa equação, fica evidenciado o processo dispersivo das ondas, onde as ondas com maior comprimento, conseqüentemente maior período, possuem maiores velocidades de propagação. Porém, quando as ondas chegam a águas rasas ($h/L \leq 1/20$), a função $\tanh(k_w h) \approx k_w h$ e a velocidade de propagação fica $C = \sqrt{gh}$. Assim, quando a onda se propaga em águas rasas, acaba o processo dispersivo e a celeridade é função apenas da profundidade em que a onda se encontra.

$$C^2 = \frac{g}{k_w} \tanh(k_w h) \quad (3.9)$$

Derivando o potencial de velocidades (Eq. 3.6) em relação à x e z , obtêm-se as velocidades sob a onda horizontal (Eq. 3.10) e vertical (Eq. 3.11), respectivamente. Pelas Equações 3.10 e 3.11, é observado que as componentes de velocidades estão defasadas de 90° , os valores máximos de u ocorrem em $(k_w x - \sigma t) = 0, \pi, \dots$ (abaixo da crista e da cava). Por outro lado, os valores máximos de w ocorrem em $(k_w x - \sigma t) = \pi/2, 3\pi/2 \dots$ (na posição de repouso). Na Fig. 3.3 são mostradas as componentes de velocidade sob a onda nos pontos de máxima velocidade horizontal e vertical num período.

$$u = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{H\sigma}{2} \frac{\cosh[k_w(h+z)]}{\sinh(k_w h)} \cos(k_w x - \sigma t) \quad (3.10)$$

$$w = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{H\sigma}{2} \frac{\cosh[k_w(h+z)]}{\sinh(k_w h)} \sin(k_w x - \sigma t) \quad (3.11)$$

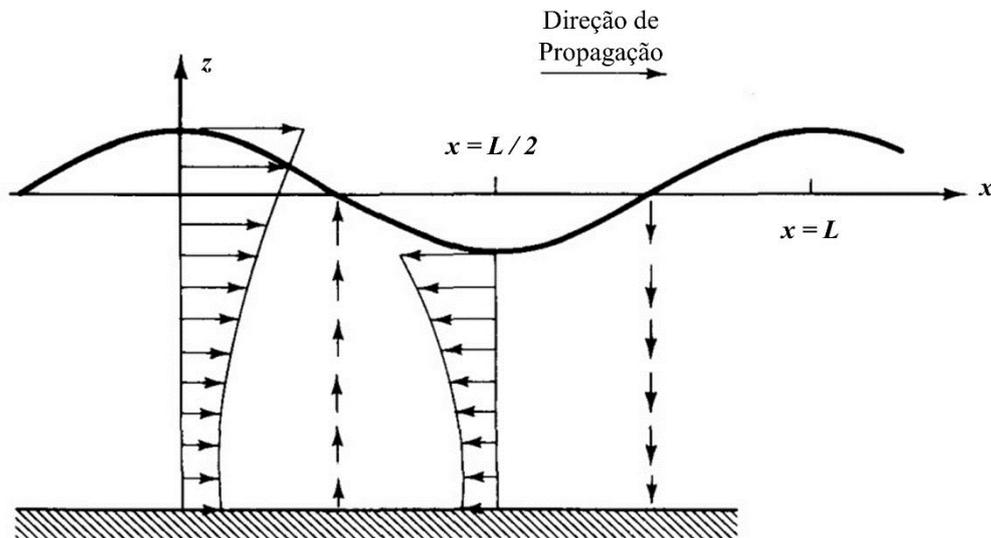


Figura 3.3 – Campo de velocidades sob uma onda progressiva. (Fonte: Dean e Dalrymple(1991))

A energia total disponível numa onda linear por unidade de área de superfície (E_L) consiste na soma de duas componentes de energia (Eq. 3.12): energia potencial (EP), devido ao deslocamento da superfície livre, e energia cinética (EC), devido ao deslocamento das partículas do fluido sob a onda. Na teoria linear é mostrado que a energia potencial de uma onda é igual a sua

energia cinética (Eq. 1.12). Já o módulo do fluxo de energia transportado por uma onda linear por unidade de comprimento de frente de onda (F_L) é dado pela multiplicação da energia total de uma onda linear pela velocidade de grupo (Eq. 3.13), enquanto que a direção é a mesma de propagação da onda. A velocidade de grupo (Cg) representa a velocidade de propagação de um grupo de ondas (Eq.3.14).

$$EP = EC = \frac{1}{16} \rho g H^2 \therefore E_L = EP + EC = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (3.12)$$

$$F_L = Cg E_L = \frac{\rho g^2}{32 \pi} H^2 T \left[1 + \frac{2k_w h}{\sinh 2k_w h} \right] \tanh k_w h \quad (3.13)$$

$$Cg = \frac{gT}{4 \pi} \left[1 + \frac{2k_w h}{\sinh 2k_w h} \right] \tanh k_w h \quad (3.14)$$

3.1.2. Teoria Espectral de Ondas

A teoria linear de Airy é válida apenas para ondas monocromáticas, caracterizada por uma altura, um período e uma direção, propagando-se em um canal. Isso só é possível de ser observado em laboratórios. Nas superfícies dos mares, as ondas variam em altura, direção e período, principalmente perto da zona de geração. À medida que as ondas se distanciam do local onde foram geradas, há uma tendência de organização das ondas em faixas semelhantes de período e direção, porém não ocorre a condição de onda monocromática.

As ondas do mar podem ser representadas como a superposição de inúmeras ondas com diferentes períodos, direções e alturas (Goda, 2010). O objetivo de descrever as ondas oceânicas com espectros não é reproduzir em detalhes uma observação da superfície do mar, mas sim apresentar a superfície do mar através de um processo estocástico, ou seja, através da representação do mar como um processo aleatório que pode ser representado por uma série de Fourier, Eq. 3.15.

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2 \pi f_i t + \alpha_i) \quad (3.15)$$

onde: a_i e α_i são a amplitude e a fase da onda, respectivamente, de cada frequência $f_i = i/D$ ($i = 1, 2, 3, \dots$; o intervalo de frequência portanto $\Delta f = 1/D$, sendo D a duração da amostra.). Com a análise de Fourier, pode-se determinar o valor da amplitude e da fase para cada frequência e com

isso obter o espectro de amplitude e fase (Holthuijsen, 2007), Fig. 3.4.

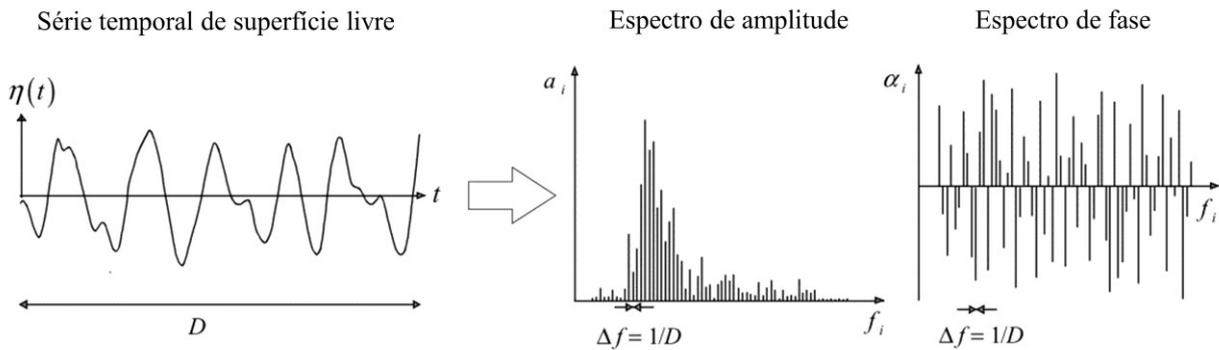


Figura 3.4 – Superfície observada, espectro de amplitude e espectro de fase.

(Fonte: Holthuijsen (2007)).

O espectro de fase será ignorado nos próximos passos e restará apenas o espectro de amplitude para caracterizar um registro ondulatório. Se repetirmos o experimento, em outras palavras, medir a elevação de superfície livre novamente em uma condição estatisticamente idêntica, o tempo de medição será diferente e por consequência o espectro de amplitude. Para remover esse problema de amostragem para obtenção do espectro de amplitude médio é necessário repetir o experimento muitas vezes (M) e adotar a média dos experimentos, para chegar num espectro de amplitude médio, Eq. 3.16.

$$\bar{a}_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M a_{i,m} \text{ para todas as frequências } f_i \quad (3.16)$$

onde $a_{i,m}$ é o valor de a_i no experimento de número m . Para valores grandes de M o valor de \bar{a}_i converge. Porém, é mais significativo ao invés da amplitude representar a variância de cada componente da onda $1/2\bar{a}_i^2$. Há duas razões para isso: a primeira é pela maior relevância estatística desse parâmetro e a segunda é que de acordo com a teoria linear a energia da onda é proporcional a sua variância. Isso implica que através da variância é possível fazer uma ligação com propriedades físicas da onda como: energia, velocidade das partículas, variações de pressão, etc. Na Equação 3.17 é mostrada como é obtido o espectro de densidade de variância unidimensional.

$$E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} E\left\{\frac{1}{2}\bar{a}^2(f)\right\} \quad (3.17)$$

onde: $E(f)$ é o espectro de variância unidimensional, Δf é intervalo de frequência e \bar{a} é a amplitude da componente de onda tratada como uma variável aleatória. Multiplicando a equação

3.17 por ρg em vez do espectro de variância, obtém-se o espectro de densidade de energia em função da frequência. Fisicamente esse espectro mostra como a energia contida nas componentes da onda está distribuída nas frequências do espectro. Em geral, a aparência das ondas no mar pode ser inferida pela forma do espectro. Espectros estreitos representam ondas mais regulares, enquanto que espectros largos representam ondas com grande irregularidade, ver Fig. 3.5 (Holthuijsen, 2007).

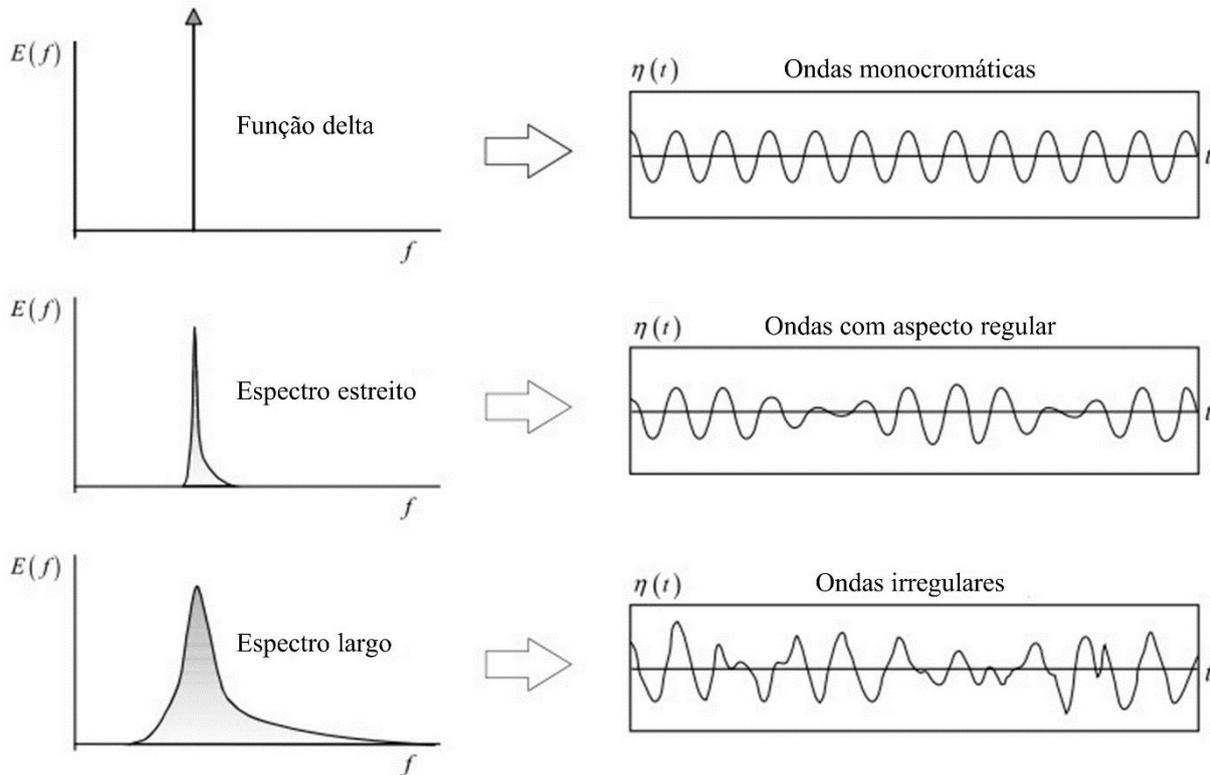


Figura 3.5 – Características do estado ondulatório de acordo com a forma do espectro (Fonte: Holthuijsen (2007)).

Embora o espectro em frequência indique muitas características a respeito da agitação ondulatória, tal representação não engloba os aspectos direcionais que são, também, de grande importância. Então, para uma representação completa do estado de mar, é necessário acrescentar a teoria desenvolvida a direção de incidência das ondas, Eq. 3.18. Para fazer isso, serão consideradas ondas harmônicas propagando-se no espaço $x - y$, com direção θ relativa à posição do eixo x .

$$\eta(x, y, t) = a \cos(ft - k_{wx}x - k_{wy}y + \alpha) \quad (3.18)$$

onde $k_{wx} = k_w \cos \theta$ é o número de onda na direção x e $k_{wy} = k_w \sin \theta$ é número de onda na direção y . Análogo ao espectro de frequências, o espectro bidimensional é obtido através da soma de um

grande número de componentes harmônicas de ondas direcionais que pode ser representado por uma série de Fourier, Eq. 3.19.

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \underline{a}_{i,j} \cos(f_i t - k_{wi} \cos \theta_j - k_{wi} \sin \theta_j + \alpha_{i,j}) \quad (3.19)$$

Foram adicionadas ao tempo (t) duas dimensões horizontais (x e y), porém, ao invés dessas variáveis, serão usados a frequência (f), o número de onda (k) e a direção (θ), o que resultaria em três somatórios. Entretanto, pela relação da dispersão (Eq. 3.8) tem-se que cada número de ondas (k_w) corresponde a uma dada frequência (f). Então, o modelo aparentemente tridimensional pode ser reduzido a um modelo bidimensional em termos de frequência (ou número de onda) e direção. De maneira semelhante ao espectro de frequências, o espectro bidimensional é definido pela Eq. 3.20. Adotando o Sistema Internacional de Unidades (SI) a unidade de $E(f, \theta)$ é [m²/Hz/radianos] e a representação gráfica do espectro bidimensional utiliza o eixo direcional em coordenadas polares (ver Fig. 3.6).

$$E(f, \theta) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{\Delta \theta \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f \Delta \theta} E \left\{ \frac{1}{2} \underline{a}^2 \right\} \quad (3.20)$$

Uma característica muito presente em diversas regiões do mundo é a presença de dois mares com direções e frequências completamente diferentes atuando simultaneamente, tal fenômeno é denominado bimodalidade de mares. Na Fig. 3.6 é mostrado um espectro bidimensional e seu respectivo espectro de frequência para um caso onde se tem bimodalidade de mares. Nota-se, através do espectro bidimensional, que as componentes das ondas geradas na tempestade longínqua são representadas por um espectro estreito devido à relação da dispersão que tende a organizar a onda em frequências e direções semelhantes à medida que as ondas se distanciam da zona de geração. Por outro lado, as ondas geradas localmente possuem espectro largo e, por consequência, possuem grande irregularidade.

Do espectro bidimensional é possível extrair parâmetros importantes para a caracterização das ondas como: altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção de pico (D_p). A altura significativa representa a média da terça parte das maiores alturas de ondas individuais, e pode ser determinada pela Eq. 3.21. O período de pico e a direção de pico são, respectivamente, o período e a direção do pico do espectro, em caso de mares bimodais é comumente representado apenas a direção e a frequência do pico mais energético.

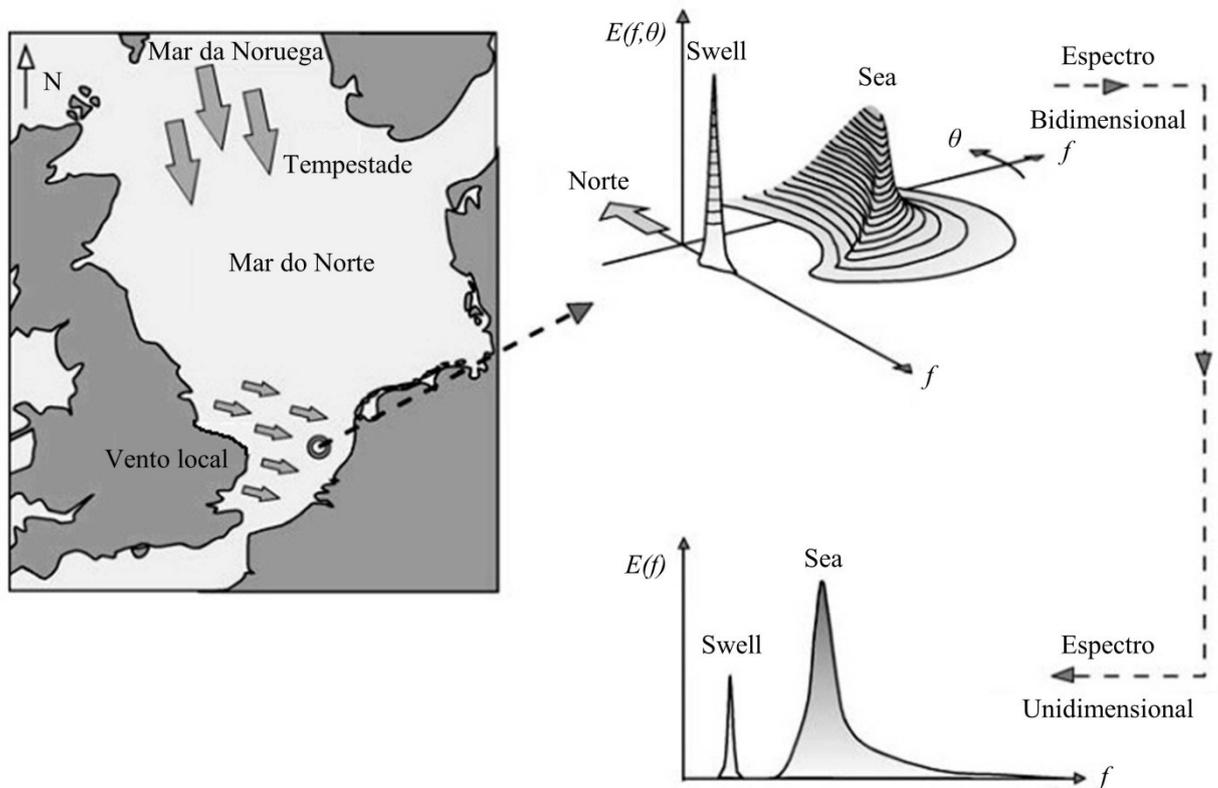


Figura 3.6 – Espectros bidimensional e unidimensional com características de mar bimodal

(Fonte: Holthuijsen (2007)).

$$H_s = 4 \sqrt{\int \int E(f, \theta) df d\theta} \quad (3.21)$$

O módulo do fluxo de energia associado ao espectro bidimensional é dado pela integração dupla na frequência e na direção do espectro bidimensional ($E(f, \theta)$) multiplicado pela velocidade de grupo (C_g) (Eq. 3.14), massa específica da água do mar (ρ) e pela gravidade (g), Eq. 3.22. Já a direção do fluxo é associada às componentes individuais das ondas que compõem o espectro.

$$F_E = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} C_g(f, \theta) E(f, \theta) df d\theta \quad (3.22)$$

Entretanto, é comum que o fluxo de energia de um estado de mar aleatório seja representado através dos parâmetros altura significativa (H_s) e pelo período de energia (T_e) (Funke e Mansard (1979); Count et al. (1983) e Pontes et al. (1995)), Eq. 3.24. Este período é calculado pela relação entre os momentos de espectros m_{-1} e m_0 ($T_e = m_{-1}/m_0$); sendo que o n -ésimo momento espectral é obtido através da Eq. 3.23.

$$m_n = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f^n E(f, \theta) df d\theta \quad (3.23)$$

$$F_E = \frac{\rho g^2}{64 \pi} Hs^2 Te \left[1 + \frac{2 k_w h}{\sinh 2 k_w h} \right] \tanh k_w h \quad (3.24)$$

A Eq. 3.22 é equivalente a Eq. 3.24. Na literatura de WECs, o Te tem sido interpretado como o período de uma única onda senoidal com a mesma energia do estado de mar. Ora, a energia de uma onda é dada por sua altura (Eq. 3.12), não por seu período. Pela definição de Te supõe-se que a altura dessa única onda senoidal seja a própria Hs . Entretanto, comparando a Eq. 3.24 com a Eq. 3.13, percebe-se que o fluxo de energia transportado por uma onda espectral (Eq. 3.24) é a metade do fluxo transportado por uma onda monocromática (Eq. 3.13). Com isso, na transformação de uma situação espectral de fluxo de energia para uma situação monocromática, a altura de onda que representa essa única onda monocromática é a $H_{rms} = Hs/\sqrt{2}$ (Melo F°, 2012).

3.2. Modelos de Propagação e Geração de Ondas

Existem diversos tipos de modelos computacionais de geração e propagação de ondas com diversos campos de aplicações. Os modelos de geração e propagação de ondas podem ser utilizados para estudos de grande escala, como a reconstituição e a previsão das condições ondulatórias globais, até para problemas complexos, onde é necessária uma maior precisão como os necessários para a determinação dos esforços causados pelas ondas em estruturas costeiras e oceânicas. Cada estudo de caso requer uma análise detalhada do melhor modelo a ser utilizado.

Os modelos de propagação e geração de ondas são divididos em dois tipos (Liu e Losada, 2002): Os modelos que resolvem a fase (*phase-resolving models*) e os modelos que utilizam a fase média (*phase-averaged models*). Os modelos do tipo *phase-resolving* são baseados em uma integração vertical da equação de conservação de massa e de quantidade de movimento. Os modelos de declive suave, de Boussinesq e dos raios são exemplos de modelos que resolvem a fase. Os modelos *phase-averaged* são baseados na equação de balanço de ação espectral ou energia espectral (Eq. 3.35 e 3.36), por isso também são chamados de modelos espectrais.

Enquanto, os modelos do tipo *phase-averaging* quase não possuem limitações quanto ao tamanho da área modelada, os modelos do tipo *phase-resolving*, embora mais precisos, são restritos a pequenas áreas, devido aos elevados custos computacionais necessários para suas simulações (Hiles, 2010). Além da área modelada, deve-se ter cuidado com os processos físicos dominantes no

estudo de caso em questão para a escolha do modelo numérico. Existem modelos que simulam a geração de ondas pelo vento local, porém não são capazes de resolver a difração de ondas. Então, usando esse tipo de modelo não é possível estudar as transformações de ondas que ocorrem ao redor de quebra-mares.

O aumento contínuo da capacidade computacional tem propiciado simulações desde a propagação de ondas nos oceanos até a interação dessas com estruturas marítimas, que usam um misto de simulações globais com regionais acoplados, com diferentes acurácias, para contemplar os fenômenos mais importantes de cada zona do domínio. Assim, os modelos baseados nas equações de Navier-Stokes, com maior exigência computacional e precisão, também tem encontrado um grande espaço na simulação numérica de ondas do mar, pois tratam de forma adequada os escoamentos de fluidos, principalmente quando esses possuem gradientes de velocidades significativos na vertical.

3.2.1. Wave Watch III

O Wave Watch III (WWIII) é um modelo gratuito de previsão e reconstituição de ondas geradas pelo vento em escala global. Este modelo faz a previsão e a reconstituição da agitação ondulatória para a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (Tolman, 2009). Embora o WWIII seja o modelo de águas profundas, nas suas últimas atualizações foram incorporados os termos necessários para a modelagem de propagação e geração de ondas em águas intermediárias e rasas. O WWIII resolve a equação do balanço de ação espectral (Eq. 3.25) que trata os processos físicos relevantes como fontes e sumidouros de energia na equação de conservação (Eq. 3.26) (Tolman, 2009).

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} N C g_x + \frac{\partial}{\partial y} N C g_y + \frac{\partial}{\partial \theta} N C_\theta + \frac{\partial}{\partial \sigma} N C_\sigma = \frac{S}{\sigma} \quad (3.25)$$

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} \quad (3.26)$$

onde: $N(\sigma, \theta)$ é a densidade de ação espectral, σ é a frequência angular relativa e θ é a direção da onda. Nas Equações 3.25, o primeiro termo do lado esquerdo representa a variação da densidade da ação, o segundo e o terceiro termos indicam a propagação da densidade da ação no espaço geográfico x e y com respectivas velocidades de propagação $C g_x$ e $C g_y$. O quarto termo está relacionado com a refração induzida por correntes e/ou por profundidade com velocidade de propagação C_θ no espaço θ . O quinto termo é a transferência de energia entre frequências relativas

relacionadas à variação na profundidade e correntes com velocidade de propagação C_σ no espaço σ . O termo S é o de fonte e sumidouro de energia (Eq. 3.26), onde S_{in} representa a geração de energia pelas ondas de vento, S_{nl} são as interações não lineares onda-onda, S_{ds} reproduz a dissipação por *whitecapping*, S_{bot} descreve a dissipação por atrito com o fundo e S_{db} expressa a rebentação induzida pela profundidade.

O WWIII utiliza os campos de vento para a determinação das condições ondulatórias. No site da NOAA é possível obter os campos de vento para as últimas décadas provenientes de reanálise. Embora não sejam dados medidos, os dados de reanálise são mais precisos que os de previsão, pois utilizam medições pontuais para a calibração dos modelos meteorológicos. Além dos campos de vento, a NOAA também disponibiliza os dados sintéticos de ondas (H_s , T_p e D_p) para uma grade geográfica de $0,5^\circ$. No presente trabalho, não serão realizadas simulações utilizando o modelo WWIII, mas serão utilizados os dados reanalisados disponíveis gratuitamente no repositório da NOAA.

Aguiar et al., 2013 avaliaram o desempenho do modelo WWIII para Rio Grande, RS. Os dados sintéticos de onda (H_s , T_p e D_p) foram obtidos no repositório da NOAA e comparados com medições realizadas pela boia minuano (PNBOIA). Nessa comparação, os autores chegaram a um *Scatter Index* (SI) de 0,182 para H_s e 0,192 para T_p , comprovando que o WWIII faz uma boa reprodução das condições ondulatórias nessa região.

3.2.2. Mike 21 SW

O Mike 21 SW (*Spectral Waves*) é um modelo de propagação e geração de ondas espectrais de terceira geração desenvolvido pela *Danish Hydraulic Institute* (DHI). O Mike 21 SW é capaz de simular o crescimento, a dissipação e as transformações das ondas nos oceanos e em áreas costeiras. Esse modelo é amplamente aplicado na determinação das cargas referentes à ação das ondas em projetos de estruturas oceânicas, costeiras e portuárias, onde o conhecimento acurado das condições ondulatórias é necessário para o dimensionamento seguro e econômico. Além disso, é um modelo amplamente validado e utilizado para a reconstituição e previsão da agitação marítima em escala local, regional e global (DHI, 2014b).

O Mike 21 SW é um modelo que aplica a técnica dos volumes finitos para a resolução das equações constituintes. Esse modelo engloba os seguintes fenômenos físicos: geração de ondas pelo vento, refração, empolamento, interações não lineares entre ondas, dissipação por *whitecapping*, dissipação de energia por atrito com o fundo, dissipação por rebentação induzida pela profundidade e interações onda-onda e onda-corrente (DHI, 2014a).

No Mike 21 SW, as ondas são descritas por meio da equação do balanço da ação (Eq. 3.25), semelhante ao modelo WWIII. Para a descrição do domínio computacional é possível escolher entre os sistemas de coordenadas cartesianas e o sistema de coordenadas esféricas. Geralmente, a escolha do sistema de coordenadas esféricas é utilizada para estudos de caso com escala continental ou global e o sistema de escala cartesiana para estudos de caso de escalas regional ou local. A representação do domínio computacional pode ser realizada através de malhas não estruturadas, estruturadas ou uma combinação dessas. A utilização de malhas não estruturadas traz a vantagem de ter-se menos células, uma vez que, neste caso, é possível refinar apenas as regiões de interesse (DHI, 2014c).

O Mike 21 SW apresenta a possibilidade de ser executado no modo quase estacionário e no modo não estacionário. Simulações quase estacionárias são justificadas quando o tempo de residência das ondas simuladas (tempo que as ondas necessitam para atravessar o domínio computacional) é relativamente menor que o tempo das mudanças das forçantes nas condições de contorno. À medida que o domínio computacional aumenta e, conseqüentemente, o tempo de residência, simulações não estacionárias tornam-se mais apropriadas (Van Der Westhuysen, 2008).

No modo estacionário, o primeiro termo da equação do balanço da ação que representa a variação da densidade da ação no tempo é negligenciado (ver Eq. 3.25). Então, quando há a geração de ondas pelo vento, no modo quase estacionário, considera-se a duração do vento suficiente para chegar a uma situação de equilíbrio. No caso de ventos fortes, essa simplificação pode ser uma grande fonte de erro.

3.2.3. Fluent

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem que descrevem o escoamento de fluidos, Eq. 3.27. Estas equações possuem quatro incógnitas e devem ser combinadas com a equação da continuidade para escoamentos incompressíveis (Eq. 3.28) para ter-se um sistema de equações possível de ser determinado (White, 2011). As equações de Navier-Stokes e da continuidade serão expressas através da notação indicial.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.28)$$

onde: ρ é a massa específica do fluido, u é a velocidade, p é a pressão e μ é a viscosidade. Entretanto, os escoamentos na natureza são comumente turbulentos, onde a velocidade sofre flutuações no espaço e no tempo. Para contornar este efeito, foi adotada uma abordagem onde a velocidade (u) é decomposta em uma média (\bar{u}) e uma componente de flutuação (u'), Eq. 3.29. Então, na equação de Navier-Stokes surge um termo adicional ligado aos efeitos turbulentos (tensor de Reynolds), Eq. 3.30. Para calcular esse novo termo da equação, surge à abordagem média e a introdução de modelos turbulência.

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (3.30)$$

É utilizada a hipótese de Boussinesq para relacionar o tensor de Reynolds com os gradientes de velocidades do escoamento, Eq. 3.31. Esta é a relação fundamental para o desenvolvimento dos modelos de turbulência. Existem diversos modelos de turbulência com diferentes níveis de precisão e tempo computacional; nesse trabalho foi usado o modelo turbulência do tipo k - ε implantado no Fluent e as equações desenvolvidas para lidar com a turbulência serão as deste modelo.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3}(\rho k) \delta_{ij} \quad (3.31)$$

onde: μ_t é a viscosidade turbulenta, k é a energia cinética turbulenta e δ_{ij} é o delta de Kronecker. O modelo k - ε supõe que o fluxo é totalmente turbulento e que os efeitos de viscosidade molecular são desprezíveis. Este modelo baseia-se em uma formulação semi-empírica baseado nas equações do transporte para a energia cinética turbulenta (k) e para a taxa de dissipação (ε), Eq. 3.32 e 3.33.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.33)$$

onde: G_k é a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidades, G_b é a

geração de energia cinética turbulenta devido a flutuação, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes, σ_k e σ_ε são os números de Prandtl para k e ε , respectivamente. Para a determinação da viscosidade turbulenta é utilizada uma combinação entre a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação (ε), como mostra a Eq. 3.43 (Launder e Spalding, 1974; Wilcox, 1988).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.34)$$

onde: C_μ é uma constante. Foram utilizados os valores padrões das constantes e dos números de Prandtl que foram determinados através de experimentos em escoamentos turbulentos. Por fim, é calculada a geração de energia turbulenta utilizando a equação de transporte para k , Eq. 3.35.

$$G_k = -\rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.35)$$

Para a simulação de escoamentos multifásicos de fluidos imiscíveis, a superfície livre é modelada utilizando o método VOF (Volume of Fluid) (Hirt e Nichols, 1981). Nesse método, as equações governantes do escoamento são resolvidas na água e no ar e são impostos escalares para a definição da fração volumétrica (C_m). O movimento da interface entre os fluidos é dado pela equação do transporte da fração volumétrica, Eq. 3.36. Desta forma, no ar é imposto um escalar com valor igual a 0 e na água igual a 1. A posição da superfície livre está localizada no valor de 0,5.

$$\frac{\partial(C_m)}{\partial t} + u \nabla(C_m) = 0 \quad (3.36)$$

O modelo Fluent, desenvolvido pela ANSYS, baseia-se no método dos volumes finitos para a resolução das equações RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) (Eq. 3.30) (ANSYS, 2015). As variáveis a determinar, como pressão e velocidade, estão localizadas no centro do volume de controle de cada célula (Verteeg e Malalasekera, 2007).

3.3. Equipamentos Conversores de Energia das Ondas

A possibilidade de extração de energia das ondas do mar tem inspirado inúmeros pesquisadores e engenheiros em desenvolver e aprimorar equipamentos capazes de transformar a energia das ondas em energia elétrica. Como não há uma tecnologia ainda estabilizada, existe uma grande variedade de equipamentos com diferentes concepções de funcionamento para a extração da energia das ondas. Segundo Falcão (2010), os equipamentos conversores de energia das ondas podem ser classificados de acordo com a sua localização (junto à costa, perto da costa e ao largo),

princípio de funcionamento (coluna de água oscilante, corpos oscilantes e galgamento) e tamanho (absorvedores pontuais ou grandes absorvedores). Na Fig. 3.7 é mostrada a classificação, em três classes, de alguns equipamentos conversores segundo o princípio de funcionamento.

3.3.1. Coluna de Água Oscilante

A coluna de água oscilante (CAO), objeto desse estudo, é formada por uma câmara parcialmente submersa com uma abertura abaixo da linha da água. Devido à ação das ondas, o nível da água dentro da câmara sobe e desce, comprimindo e expandindo o ar dentro da câmara que aciona uma turbina acoplada a um gerador. Nesse tipo de equipamento, geralmente, é utilizado uma turbina do tipo Wells que possui sentido de rotação único independente do sentido do escoamento do ar. Na Fig. 3.8 é mostrado um esquema do princípio de funcionamento da CAO.

As CAO's podem ser estruturas fixas (na costa ou em quebra-mares) ou flutuantes presas por cabos de ancoragem. Embora localizada em regiões com menor potencial energético, as estruturas fixas na costa ou em quebra-mares apresentam a vantagem de possuírem menores custos de instalação e manutenção. Já as estruturas flutuantes possuem a vantagem de estarem localizadas onde o potencial energético é mais elevado, porém os custos de manutenção e instalação são mais elevados, assim como o custo de transmissão da energia gerada.

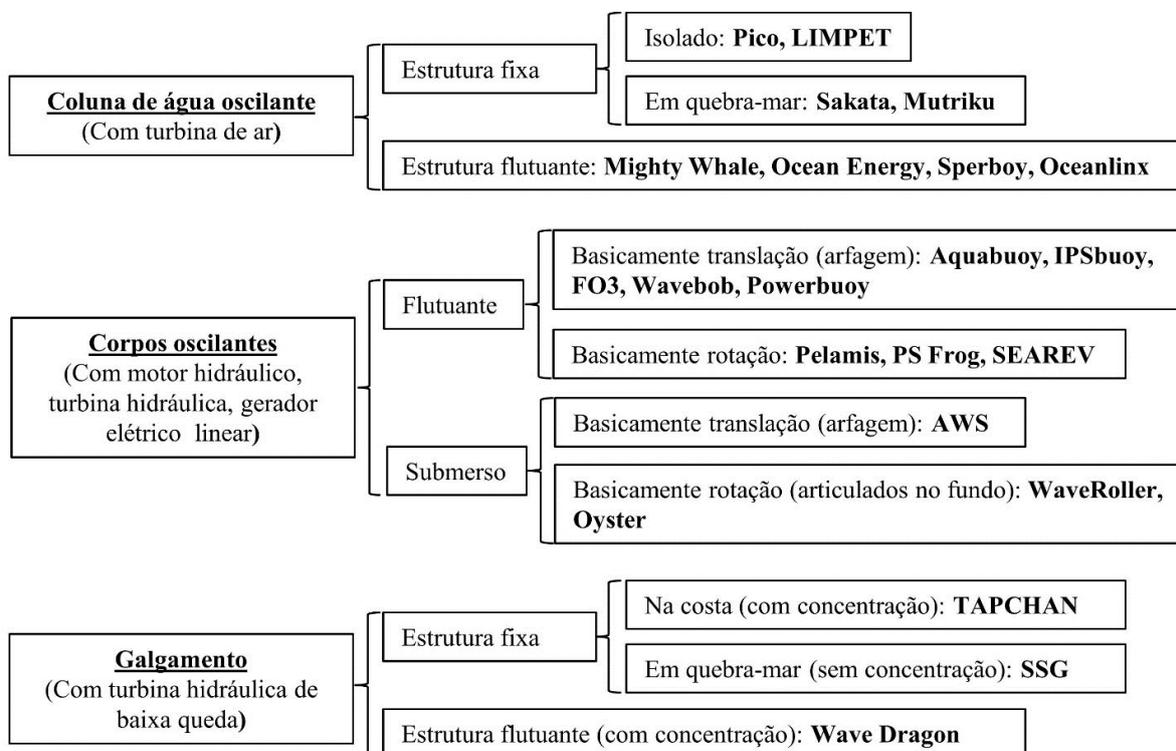


Figura 3.7– Classificação dos equipamentos de extração de energia das ondas segundo o princípio de funcionamento (Fonte: Falcão (2010).)

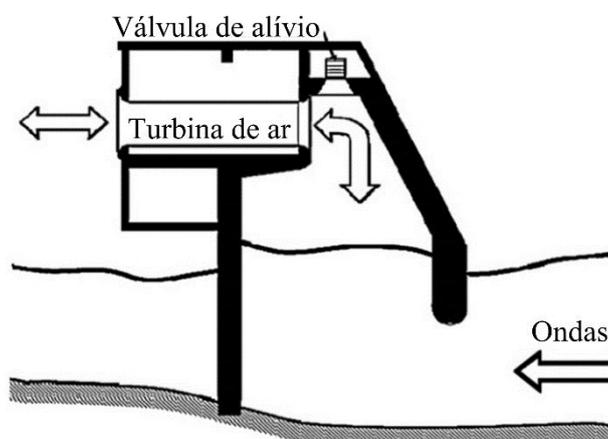


Figura 3.8 - Princípio de funcionamento da CAO (Fonte: Falcão (2010)).

Protótipos em escala real foram construídos em Toftestallen (Noruega), Sakata (Japão), Vizhinjam (Índia), Pico (Portugal) e LIMPET (Escócia) com áreas transversais entre 80 m² a 250 m² e capacidade de potência instalada entorno de 60 kW a 500 kW (Falcão, 2010). Entretanto, até chegar à etapa de construção de um protótipo em escala real, simulações numéricas e testes em escala reduzida são necessários para o projeto e a otimização das CAO's

No âmbito da simulação numérica, muitos estudos são realizados com o objetivo de aperfeiçoar o desempenho deste tipo de dispositivo, destacando-se: Teixeira et al. (2013) que através de dois modelos numéricos analisaram a geometria ótima da câmara e as características da turbina que oferecem o melhor desempenho ao dispositivo. Lopez et al. (2014) utilizando um modelo do tipo RANS-VOF estudaram a performance de turbinas (através de coeficientes de amortecimento) em diferentes condições ondulatórias. Lopez et al. (2016) determinaram numericamente o desempenho de um cluster CAO's equipada com uma turbina de impulso auto-retificadora em um clima de ondas particular. Torres et al. (2016) implementaram numericamente sistemas de controle de pressão e rotação da turbina com o objetivo de melhorar o desempenho de CAO's.

3.3.2. Corpos Oscilantes

O princípio de funcionamento deste tipo de dispositivo é baseado na oscilação devido à incidência de ondas em corpos flutuantes ou submersos em relação a uma referência fixa ou a partes do próprio equipamento. Tais equipamentos podem ser classificados de acordo com o movimento utilizado para a absorção de energia das ondas (translação ou rotação) e a posição em relação ao fundeio do equipamento (flutuante ou submerso). O movimento relativo dos corpos oscilantes pode ser utilizado para comprimir o fluido de trabalho, girar uma turbina ou, no caso de alguns

dispositivos de translação vertical, acionar gerador elétrico linear.

Na Fig. 3.9 são mostrados quatro exemplos de conversores de energia das ondas do tipo corpos oscilantes: (a) Wavebob, que consiste de duas estruturas oscilatórias que geram energia através da translação vertical da estrutura inferior; (b) Pelamis, que são estruturas compostas por quatro seções cilíndricas unidas por juntas articuladas que bombeia óleo em alta pressão quando submetida à ação das ondas; (c) AWS (*Archimedes Wave Swing*), que é um dispositivo composto por duas partes, onde a inferior é fixada no fundo marinho e a superior (flutuante) se movimenta com o passar as ondas na superfície d'água acionando um gerador elétrico linear; e (d) WaveRoller, que são compostos de painéis móveis que se movimentam com o passar da onda acionando bombas e pistões hidráulicos.

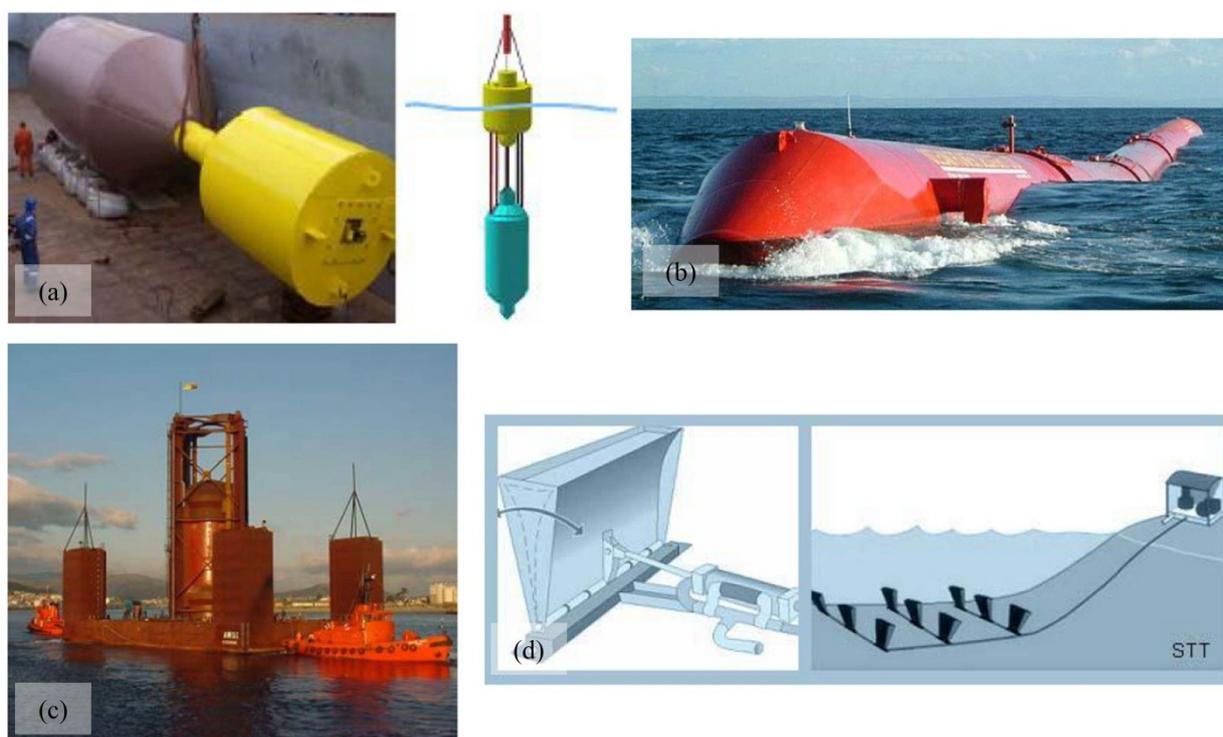


Figura 3.9 - Wavebob (a), Pelamis (b) AWS (c) e WaveRoller (d) (Fonte: Barreiro e Gil (2008)).

3.3.3. Galgamento

Outra maneira de transformar a energia das ondas em energia elétrica é através do armazenamento da água em reservatórios acima do nível médio do mar devido ao galgamento das ondas em WECs. Para conversão de energia, são instaladas turbinas hidráulicas de baixa queda na base do reservatório. Os dispositivos que utilizam o galgamento como princípio de funcionamento podem ser instalados junto à costa (em paredões rochosos), em quebra-mares ou em mar aberto (flutuantes fixos por cabos de ancoragem). Alguns desses dispositivos dispõem de estruturas laterais, denominadas concentradores, para a convergência das direções de incidência das ondas à

direção normal da rampa de acesso ao reservatório. Na Fig. 3.10 é mostrada uma ilustração do dispositivo *Wave Dragon* assim como o seu princípio de funcionamento.

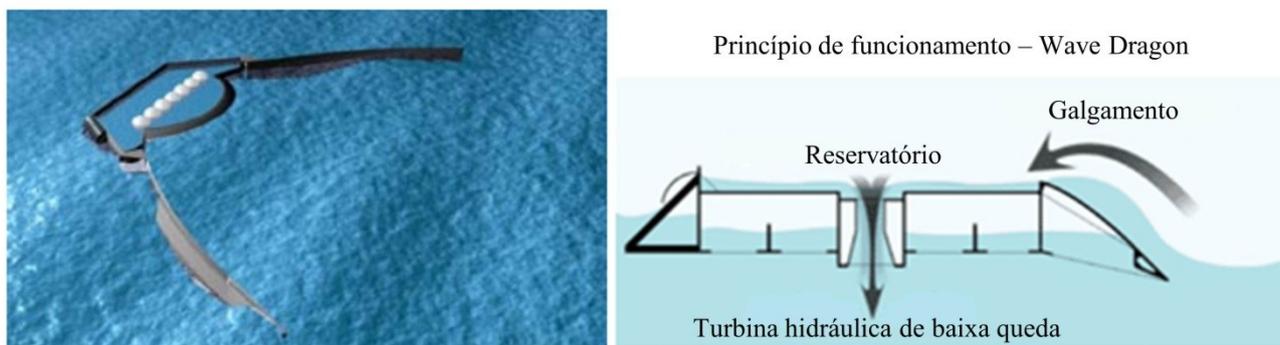


Figura 3.10 – Wave Dragon: esquema e princípio de funcionamento (Fonte: <http://www.wavedragon.net>).

3.4. Características da Região de Estudo

A região de estudo está localizada no sul do Brasil, mais especificamente no sul do estado do Rio Grande do Sul, próximo à cidade do Rio Grande (Fig. 3.11). A linha de costa tem orientação Nordeste-Sudoeste e é caracterizada por praias arenosas expostas a ação das ondas. Dos 640 km que separam os promontórios rochosos de Torres, no norte do estado ($29,5^{\circ}$ S), e o estuário do Chuí no sul ($33,8^{\circ}$ S), a única interrupção significativa ocorre na entrada da Lagoa dos Patos, em Rio Grande ($32,0^{\circ}$ S) (Cuchiara et al., 2009).

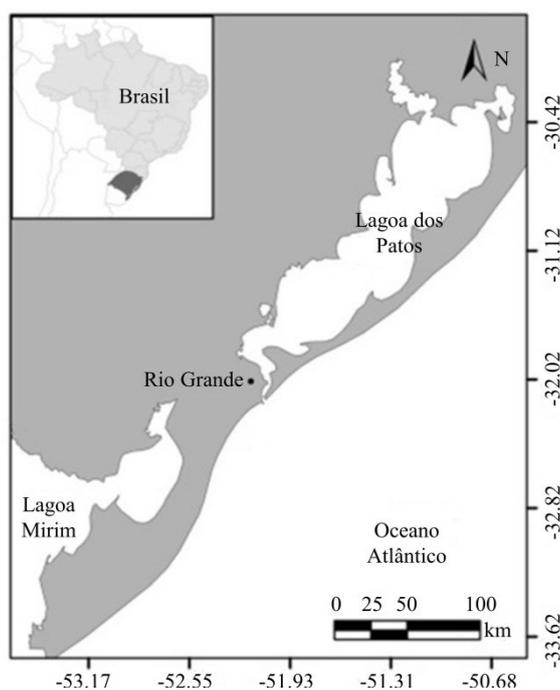


Figura 3.11 – Localização da área de estudo

A plataforma continental brasileira do sul (*Southern Brazilian Shelf* - SBS) encontra-se entre as latitudes 28° S e 35 ° S e é caracterizada por ser uma plataforma larga com inclinação suave. Do norte ao sul, a largura da SBS varia de aproximadamente 110 km a 170 km, sendo que o talude continental começa entorno da profundidade de 180 m (Marques et al, 2009). Segundo Calliari et al. (2009), o fundo marinho nessa região é composto por areia fina a muito fina, silte e em alguns pontos perto da desembocadura da Lagoa dos Patos são encontrados bolsões de lama.

Análises dos dados de intensidade e direção de ventos entre Torres e Rio Grande mostraram que a direção predominante dos ventos é de nordeste (NE), existindo algumas diferenças significativas entre as estações do ano. Porém, os ventos de maior intensidade são os de sul (S), sudoeste (SW) e de oeste (W). A região de Rio Grande é aquela que onde se nota as maiores variabilidades na direção do vento (Camargo et al., 2002). As correntes litorâneas, na área de estudo, ocorrem em ambos os sentidos, correntes de NE para SW, que são as mais frequentes ao longo do ano, e correntes de SW para NE, que são as que apresentam as maiores intensidades (Tozzi, 1999).

A costa do Rio Grande do Sul está submetida a um regime de micromarés mista com predominância da componente diurna. A pequena amplitude da maré astronômica é devido à proximidade do ponto anfidrômico (Moller et al., 1996). Apesar da maré astronômica ser pouco expressiva, o local de estudo possui uma grande influência da maré meteorológica.

Em geral, no litoral do Rio Grande do Sul, os regimes ondulatórios são marcados por vagas geradas pelo vento local e por ondulações geradas por tempestades longínquas que podem atuar simultaneamente, caracterizando um espectro bimodal, ora com predominância das vagas, ora com predominância das ondulações (Strauch et al., 2009).

Análises preliminares dos dados de onda obtidos durante o Experimento Cassino, no período de 13 de maio a 25 de junho, por um ondógrafo fixado a 25 m de profundidade indicaram a predominância de ondas com altura significativa (H_s) de 1,0 m a 3,0 m, período médio (T_m) de 6,0 s e direções de pico predominantes de NE e S (Holland et al, 2009; Cuchiara et al, 2009). Através da reconstituição de 30 anos de agitação ondulatória para a região oceânica do Rio Grande do Sul, aplicando uma técnica de agrupamento para as diferentes condições de mares presentes simultaneamente, notou-se que existe um equilíbrio entre os setores direcionais de S-SSE e NEE-ENE com percentuais de ocorrência de 30% cada. Com maior número de ocorrência de vagas do quadrante leste e ondulações do quadrante sul (Romeu et al., 2015).

4. METODOLOGIA

Este capítulo foi dividido em duas partes. Na primeira parte foram abordados os materiais e métodos utilizados para a avaliação e caracterização do potencial energético disponível na região sul do Brasil. Na segunda parte foi exposta a metodologia utilizada para a determinação e otimização da potência gerada por uma CAO, instalada na região de estudo, acoplada em um quebra-mar situado em uma profundidade de 14 m.

4.1. Avaliação e Caracterização do Potencial Energético Local

Nesta seção, foram descritas as características das simulações numéricas utilizando o modelo de propagação de ondas Mike 21 SW. Além disso, foram mostradas as metodologias utilizadas para a aferição e validação do modelo numérico e, para a avaliação e caracterização do potencial energético disponível na região de estudo.

4.1.1. Malha e Batimetria

Para a simulação numérica da propagação de ondas no modelo Mike 21 SW foi utilizada uma malha computacional não estruturada de células triangulares. Com o objetivo de determinar o tamanho das células da malha computacional, foi realizada uma análise de convergência de malha. Foram testados 56 casos de incidência de ondas com diferentes velocidades e direções do vento, com intervalo de três horas entre cada caso, representando uma semana dentro do período do Experimento Cassino e, avaliaram-se os parâmetros H_s , T_p e D_p . Quando, para refinamento de malha crescente, os valores dos parâmetros acima mencionados atingiram diferenças irrelevantes entre uma malha e a anterior, considerou-se que os resultados obtidos através da simulação numérica não dependiam do tamanho de célula utilizado. Como resultado dessa análise, chegou-se a uma malha não estruturada com 4.012 células triangulares (Fig. 4.1 a).

Os dados batimétricos foram obtidos através das cartas náuticas da DHN (Diretoria de Hidrovia e Navegação da Marinha do Brasil). As cartas usadas na confecção da batimetria foram a 90, a 2210 e a 2220, que abrangem, respectivamente, da Ilha de Santa Catarina a Maldonado, as proximidades do Porto do Rio Grande e de Rio Grande ao Arroio Chuí. Através da interpolação dos dados batimétricos nos nós das células do domínio computacional pelo método da vizinhança natural, obteve-se a batimetria para as simulações numéricas (Fig. 4.1 b).

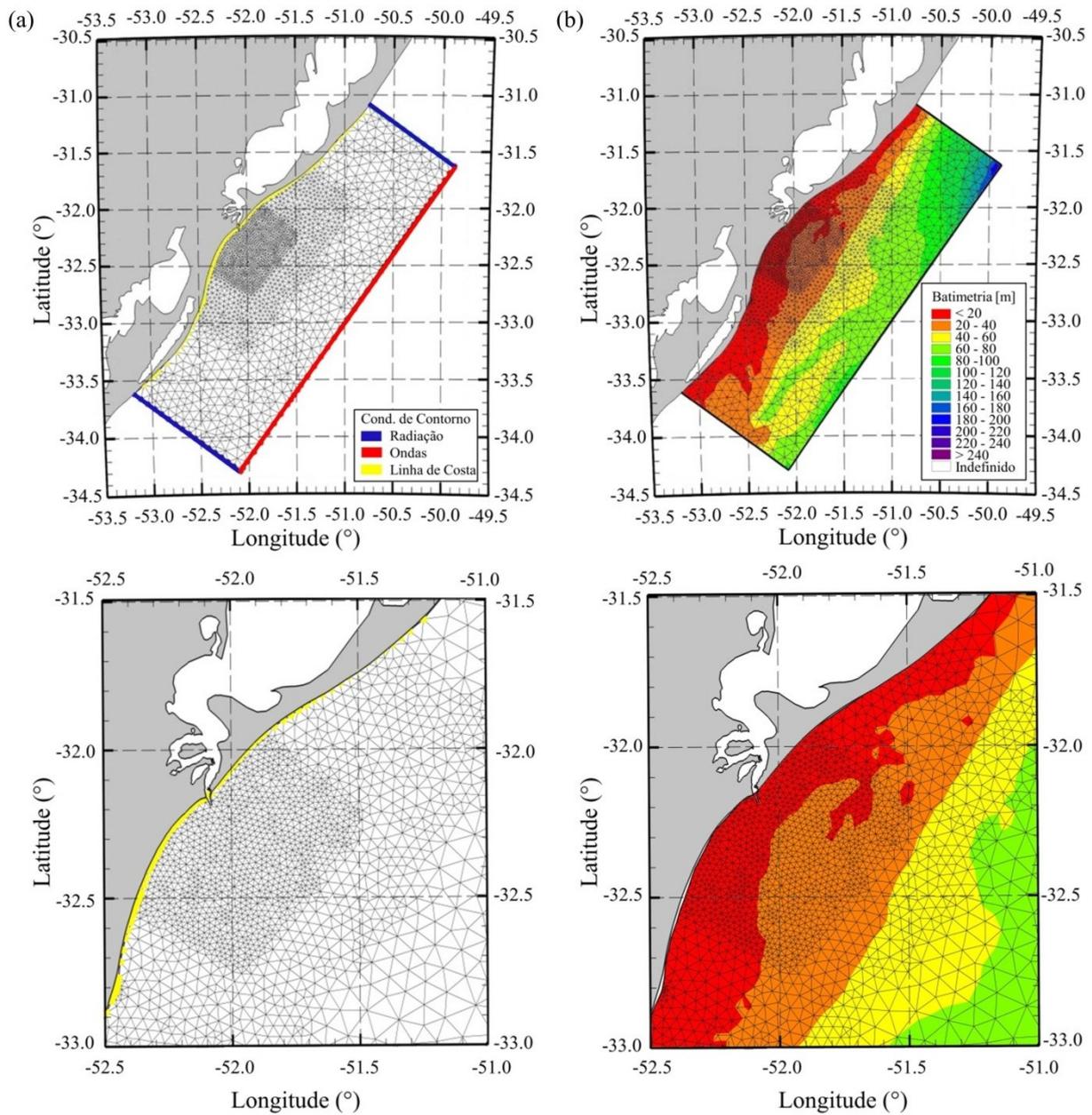


Figura 4.1 - Malha com as condições de contorno (a) e batimetria sobreposta na malha (b).

Com o objetivo de diminuir o número de células da malha computacional, o domínio foi dividido em três regiões. A primeira, com malha a mais refinada, situada na região de interesse e onde as transformações das ondas são mais intensas. A segunda região está localizada onde começam as transformações das ondas devido à interação com o fundo. Por fim, a terceira região, que está localizada onde as transformações são insignificantes e/ou onde não se tem interesse em resultados precisos. O comprimento característico das células na região mais refinada da malha é de 820 m e 12.800 m na região com tamanho de célula mais grosseira.

4.1.2. Condições de Contorno e Forçantes

Foram impostos, ao longo da fronteira externa do domínio computacional (linha em vermelho – Fig. 4.1a), espectros de ondas de três em três horas baseados em dados de H_s , T_p e D_p obtidos no ponto médio dessa fronteira, de coordenadas $33^\circ 00' S$ e $51^\circ 00' W$ (Ver Fig. 4.1), através do WWIII e retirados da série histórica global disponibilizada no site da NOAA.

Na ausência de medições, várias formulações de espectros foram desenvolvidas com base em dados sintéticos de ondas. Neste trabalho serão utilizados os espectros de frequência JONSWAP (*Join North Sea Wave Project*) (Eq. 4.1) e direcional *Cosine Power* (Eq. 4.2) com fator de aprimoramento de pico ($\gamma = 3,3$) e índice de espalhamento direcional ($s = 4$) que representa um espalhamento direcional $DS = 25,25^\circ$. Para a discretização do espectro bidimensional foram utilizadas 36 direções de 0° a 360° (espaçamento direcional $\Delta\theta = 10^\circ$) e 25 frequências, sendo a menor $0,055\text{Hz}$ e a maior $0,55\text{Hz}$ (espaçamento da frequência $\Delta f = 0,02\text{ Hz}$).

$$E(f) = \alpha_p g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} e^{\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{fp} \right)^{-4} \right]} \gamma e^{\left[\frac{(f-fp)^2}{2\sigma_s^2 fp^2} \right]} \quad (4.1)$$

$$D_w(\theta) = \cos^N(\theta - \theta_m) \quad (4.2)$$

onde, na Eq. 4.1, α_p é a constante de Philips, fp é a frequência de pico e σ_s é o parâmetro definidor da forma do espectro. Na Eq. 4.2, θ_m é a direção média. Nota-se que a condição de contorno externa está localizada em uma profundidade suficientemente grande para que as ondas incidentes ainda propaguem por uma distância considerável até começarem a sofrer as transformações devido à interação com o fundo marinho.

Nas laterais (linha em azul – Fig. 4.1 a) foi imposta a condição de contorno de radiação, onde as ondas são absorvidas quando incidem nestas fronteiras. A forma achatada do domínio computacional se deve ao clima de ondas local que possui direções de incidência de ondas quase paralela à fronteira externa, então é necessária uma longa distância entre as laterais para que essas sofram refração e atinjam a região de interesse.

Na Fig. 4.2 são mostrados os histogramas direcionais de ondas, comumente denominados rosas de ondas, para a H_s e o T_p em dez anos de análise (1997-2006) no ponto de coordenada $33^\circ 00' S$ e $51^\circ 00' W$. Observa-se que as direções predominantes de incidência de ondas são de este-nordeste (ENE) e sul (S). Nota-se também, que as ondas da direção S possuem H_s e T_p maiores

que as ondas da direção ENE, indicando que as ondas da direção S são geradas por tempestades longínquas, enquanto as ondas de ENE são geradas pelo vento local.

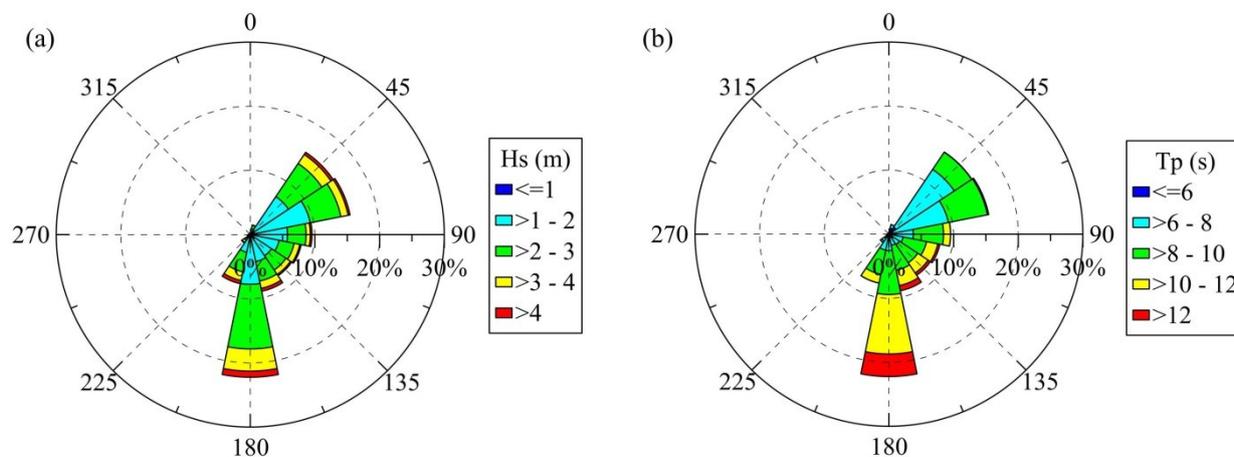


Figura 4.2 – Rosas de ondas para a H_s (a) e T_p (b) em dez anos de análise (1997-2006) no ponto de coordenadas $33^{\circ}00' S$ e $51^{\circ}00' W$.

Para as simulações com geração de ondas pelo vento local foram consideradas duas maneiras de imposição do vento local. A primeira variando o vento espacialmente, utilizou-se uma discretização espacial de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ e temporal de três horas. Os dados de vento foram obtidos do *Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)* da *National Center for Environmental Predictions (NCEP)*. A segunda com vento constante, a coordenada de retirada dos dados de vento foi $32^{\circ}30' S$ e $51^{\circ}30' W$ que é a mais próxima do centroide do domínio computacional (ver Fig. 4.1). Na Fig. 4.3a é mostrado o histograma direcional de vento, comumente denominado rosa de vento, para a coordenada $32^{\circ}30' S$ e $51^{\circ}30' W$ em um período de dez anos (1997 – 2006).

Para examinar a variabilidade espacial e temporal do vento, são mostradas séries temporais de velocidade (*wind speed - WS*) e direção (*wind direction - WD*) do vento em três pontos dentro do domínio computacional num período de 5 dias (Fig. 4.3b). Percebe-se uma elevada variabilidade tanto na direção do vento, quanto, principalmente, na velocidade. Ventos próximos à costa possuem menores velocidades que os ventos mais distantes da costa (por exemplo: entre os dias 16 e 17/06/2005, Fig. 4.3b). Em alguns instantes, foram verificadas diferenças significativas da direção do vento entre os pontos analisados (por exemplo: entre os dias 16 e 17/06/2005, Fig. 4.3b).

4.1.3. Características das Simulações

Utilizou-se, nas simulações, a formulação completa espectral (*fully spectral formulation*), que possui como equação governante a equação do balanço de ação espectral (Eq. 3.35). Para a formulação temporal, o modelo Mike 21 SW apresenta duas opções: quase estacionária, onde é considerada a ação das forçantes até uma condição de equilíbrio; e não estacionária, que leva em

conta o tempo de atuação das forçantes no domínio computacional. Na formulação não estacionária, foram utilizados passos de tempo variáveis que são determinados através do parâmetro *Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)*, mantendo o mesmo sempre menor que 0,80 (DHI, 2014b).

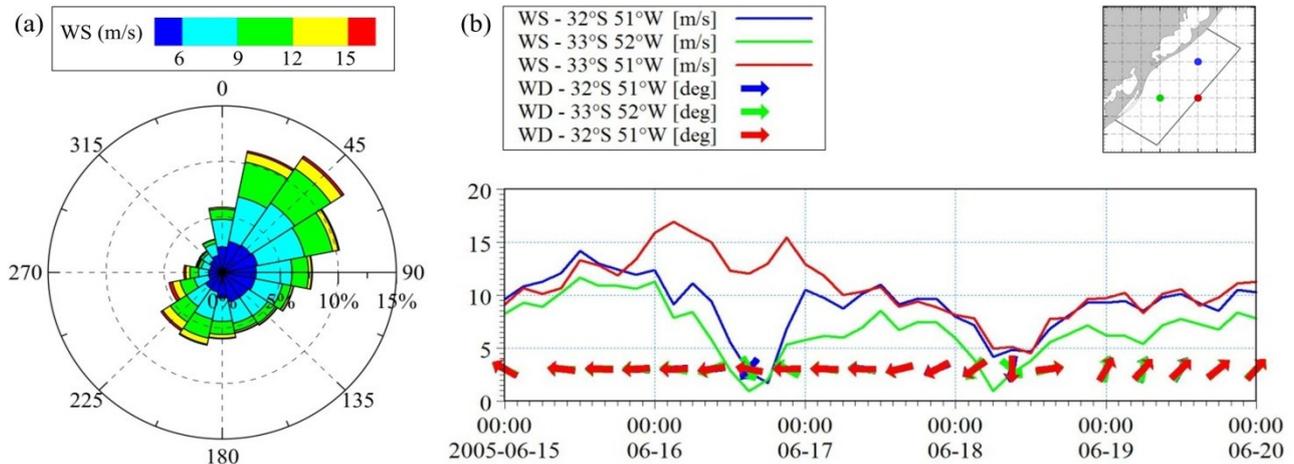


Figura 4.3 – Rosa dos ventos para dez anos (1997 – 2006) (a) e comparação da velocidade e direção do vento em três pontos do domínio computacional (b).

Nas análises onde há a geração de ondas pelo vento local, foi ativado o acoplamento ar-água, onde os valores de energia transferida do vento para as ondas dependem não apenas da velocidade do vento, mas sim, também, da rugosidade do mar. O parâmetro de Charnock utilizado foi o padrão do modelo que é igual a $z_{Charnock} = 0,01$.

A rebentação em águas profundas (*whitecapping*) é um fenômeno muito complicado de ser previsto analiticamente, pois envolve uma grande amplitude de escalas de períodos de ondas, desde as capilares até as de gravidade. Além disso, o processo de dissipação de ondas por *whitecapping* abrangem fenômenos de turbulência que são de difícil previsão. No modelo utilizado, este termo é representado como um sumidouro na equação do balanço da ação (Eq. 3.26), cujas equações foram propostas por Hasselmann (1974) e aprimoradas por Komen et al. (1984).

A dissipação por *whitecapping* pode ser aplicada em todo o espectro, porém, para condições ondulatórias onde há a presença de ondulações em conjunto com a geração de vagas pelo vento local, a aplicação da dissipação de energia em todo o espectro pode trazer um forte decaimento da energia presente nas componentes referentes às ondulações. Para minimizar tal problema, foi adotada a técnica de separação de mares, onde ondas com período de pico menor que oito segundos são consideradas vagas e é ativada a dissipação por *whitecapping* apenas nessas componentes, por outro lado, nas ondas com períodos maiores que oito segundos, consideradas ondulações, não há a dissipação por *whitecapping*. Os coeficientes de dissipação adotados nesse trabalho são os mesmos propostos por Bidlot et al. (2007) com os coeficientes de dispersão iguais a $C_{ds} = 2,1$ e $\delta = 0,6$.

À medida que as ondas se propagam em águas intermediárias e rasas, as velocidades das partículas de água sob a onda sofrem interferência do fundo e, com isso, há uma dissipação de energia devido ao atrito com o fundo. Neste trabalho serão utilizados dois métodos para tratar a dissipação por atrito com o fundo: um que considera o coeficiente de rugosidade constante (Weber, 1991) e outro que o coeficiente de rugosidade é obtido pelas dimensões das formas de fundo (*ripples*) baseado na expressão empírica de Nielsen (1979). A dissipação de ondas por rebentação ocorre quando estas se propagam em águas muito rasas. Foi utilizado o método do gama específico, onde as ondas quebram quando a relação entre altura e profundidade (H/h) atinge o valor de 0,8.

As interações não lineares entre as diferentes componentes do espectro direcional e de frequência desempenham um papel crucial para a evolução temporal e espacial do campo de ondas. As interações quadruplas controlam a estabilização da forma do espectro e fazem a transferência de energia das altas para as baixas frequências. Em águas rasas, as interações triplas onda-onda começam a ganhar importância, tais interações representam o processo de ressonância entre as componentes de ondas, que em águas rasas, resultam em alta transferência de energia e acoplamento de fases das componentes das ondas envolvidas. Para as modelagens consideraram-se apenas as interações onda-onda quadruplas utilizando a metodologia DIA (*Discretion Interaction Approximate*) proposta por Komen et al. (1984).

Na Tab. 4.1 são mostrados, de maneira sucinta, os parâmetros, as metodologias e os valores dos coeficientes adotados nas simulações utilizando o modelo Mike 21 SW. Na fase de aferição do modelo, foram testados mais de um coeficiente e/ou metodologia para o ajuste de alguns parâmetros. Portanto, os dados adicionais das características das simulações nesta fase podem ser encontrados na Tab. 4.2 e Tab. 4.3.

Tabela 4.1 – Parâmetros, metodologias e coeficientes utilizados para as simulações no Mike 21 SW.

Parâmetro	Metodologia	Coeficientes
Formulação temporal	Quase estacionária	
	Não estacionário	$CFL < 0,8$
Geração de ondas locais	Acoplamento ar-água	$z_{Charnock} = 0,01$
<i>Whitecapping</i>	Separação de mares	$C_{ds} = 2,10$
	Aplicado apenas nas vagas	$\delta = 0,60$
Atrito com o fundo	Rugosidade constante (Weber, 1991)	Tab. 4.2
	Rugosidade variável (Nielsen, 1979)	Tab. 4.2
Rebentação	Gama específico	$H/h = 0,80$
Interações não-lineares	Quadruplet – DIA	

4.1.4. Aferição e Validação do Modelo Numérico

Com o objetivo de aferir o modelo Mike 21 SW os valores simulados de H_s , T_p e D_p serão comparados com os valores medidos por um ondógrafo direcional (*Waverider*) e um *acoustic doppler velocimeter* (ADV) fixados, respectivamente, nas profundidades de 25 m e 12 m durante a campanha de medições do Experimento Cassino (Holland et al., 2009) (Fig. 4.4). Além disso, para uma análise mais rigorosa do desempenho do modelo numérico serão comparados os espectros de frequência simulados com os medidos em alguns instantes específicos.

O experimento Cassino foi um projeto multidisciplinar financiado pelo *US Office of Naval Research* e o *Naval Research Laboratory* e teve como objetivo estudar a atenuação de ondas e o transporte sedimentar na zona costeira de Rio Grande, que é marcada pela presença significativa de sedimentos coesivo provindos da Lagoa dos Patos (Meirelles e Vinzon, 2016). Nesse experimento, foi instalada uma série de equipamentos para medições de ondas, correntes e do transporte sedimentar, além do mapeamento dos bolsões de sedimentos coesivos (Holland et al., 2009).

Para a aferição do modelo, foram realizadas cinco análises em que se avaliam diferentes situações de geração de ondas pelo vento local, dissipação por atrito com o fundo e formulação temporal. Na Tab. 4.2 são mostradas as características das análises realizadas. Para a aferição da dissipação de atrito com o fundo foram utilizados sete diâmetros medianos de grão que estão dentro da faixa granulométrica presente na região de estudo (Tab. 4.3).

Tabela 4.2 – Análises realizadas para a aferição do Modelo Mike 21 SW.

Parâmetro	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4	Análise 5
Vento local	Espacial	Espacial	Espacial	Constante	Não
Regime adotado	Quase estacionário	Quase estacionário	Não Estacionário	Quase estacionário	Quase estacionário
Separação de mares	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Dissipação por atrito	Não	Aferição (Tab. 4.3)	Sim	Sim	Sim

Tabela 4.3 – Aferição do parâmetro dissipação por atrito

Parâmetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
d_{50} (mm)	0,5000	0,3530	0,2500	0,1770	0,1490	0,1250	0,0625
Classificação	Areia média	Areia média	Areia fina	Areia fina	Areia fina	Areia muito fina	Areia muito fina

Consideraram-se três situações de geração de ondas pelo vento local: com o vento variando espacialmente, constante no espaço e sem vento. Foi aplicada a separação de mares nos casos onde há a geração de ondas pelo vento local e imposto à dissipação por *whitecapping* somente nas

frequências mais altas do espectro. Para a formulação temporal foram analisados os regimes quase estacionário e não estacionário.

Em relação à dissipação por atrito com o fundo, foram analisadas duas metodologias: A primeira onde o coeficiente de atrito depende da hidrodinâmica e das propriedades do sedimento que são impostas no modelo através de um coeficiente de rugosidade constante (K_N) (Weber, 1991), que para o caso de fundos sem *ripples* é igual a duas vezes o tamanho do grão mediano (d_{50}) $K_N = 2.d_{50}$. A segunda, o coeficiente de atrito, também, depende da hidrodinâmica e das propriedades do sedimento, porém, o coeficiente de rugosidade é obtido pelas dimensões das *ripples* baseado na expressão empírica de Nielsen (1979).

Foi realizada uma análise estatística para a quantificação das diferenças entre os valores medidos e os valores observados durante a fase de aferição do modelo. Foram utilizados os parâmetros adimensionais Viés Relativo (Vr) (Eq. 4.3) e o *Scatter Index* (SI) (Eq. 4.4).

$$Vr = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n |s_i - o_i|}{n}}{\bar{o}} \quad (4.3)$$

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2}{n}}}{\bar{o}} \quad (4.4)$$

onde, s_i é um valor obtido na simulação, o_i é um valor obtido através de observação, \bar{o} é a média dos valores observados e n é o tamanho da amostra.

Para a validação do modelo Mike 21 SW, foram utilizadas as características da análise com menor erro na fase de aferição. Foram comparados os valores simulados de H_s , Tp e Dp com os valores medidos por um ondógrafo direcional (*Waverider*) fixado a 15 m de profundidade entre os anos de 1996 a 1999 (Strauch et al., 2009) (Fig. 4.4). Com isso determina-se o desempenho do modelo em reconstituições do estado ondulatório de longo período.

Entre os anos de 1996 a 1999 foi realizada uma campanha de medições em águas intermediárias através de um ondógrafo direcional localizado na desembocadura da Lagoa dos Patos. O objetivo principal dessa campanha de medições foi subsidiar uma base de dados para o projeto de recuperação do molhe leste de acesso ao canal do Porto do Rio Grande, com isso obtendo

uma base de dados importantes de longo período para estudo do clima de ondas em águas intermediárias na região sul do Brasil (Strauch et al., 2009).

4.1.5. Avaliação e Caracterização do Potencial Energético

Com o modelo Mike 21 SW aferido e validado foram reconstituídos dez anos de agitação ondulatória para a avaliação do potencial energético na região sul do Brasil. A reconstituição foi realizada entre os anos de 1997 a 2006, período que engloba as medições utilizadas na fase de aferição e validação do modelo. Além disso, nesse período, estão disponíveis no repositório da NOAA, dados de reanálise, que são mais precisos que os de previsão. Para a determinação do fluxo de energia nas células da malha computacional, foi utilizado a Eq. 3.32, que leva em conta as diferentes formas possíveis do espectro bidimensional.

Foram selecionados três pontos situados na isobatimétrica de 14 m, em frente às localidades da Querência (QUE), Cassino (CAS) e São José do Norte (SJN), com coordenadas $52^{\circ}11'06''$ W e $32^{\circ}21'01''$ S, $52^{\circ}06'36''$ W e $32^{\circ}15'46''$ S e $52^{\circ}00'29''$ W e $32^{\circ}10'48''$ S (Fig. 4.5), adequados para a extração de energia através de uma CAO instalada em um quebra-mar. Esses pontos foram escolhidos por estarem próximos as instalações do Porto do Rio Grande. Em caso de uma futura expansão das instalações portuárias pode ser levado em conta a utilização de estruturas mistas com função de abrigo portuário e geração de energia. Com o objetivo de comparar o fluxo de energia em águas intermediárias (14 m) com o existente em águas profundas (80 m), foi escolhido o ponto de coordenadas $51^{\circ}00'00''$ W e $33^{\circ}00'00''$ S localizado na condição de contorno.

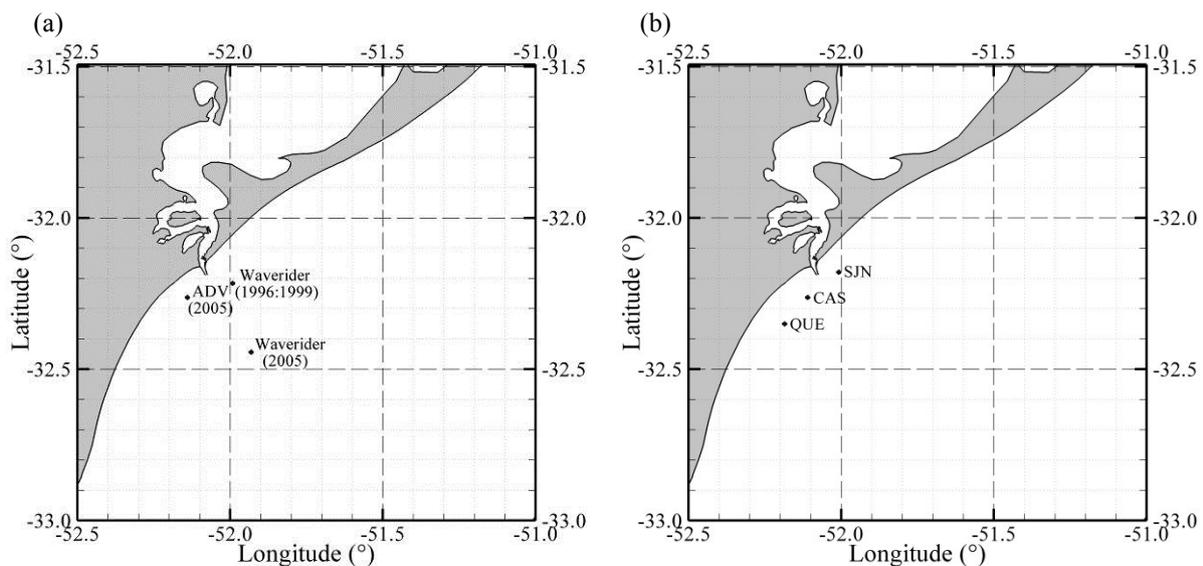


Figura 4.4 – Localização dos pontos de medição (a) e dos pontos para análise detalhada do potencial energético em águas intermediárias (b).

Um fator importante a ser levado em conta durante a avaliação do potencial energético em

uma dada região é a variabilidade direcional do fluxo de energia. Enquanto alguns WECs possuem simetria axial, ou seja, seu desempenho não depende da direção da incidência ondulatória, outros são extremamente sensíveis à direção de incidência das ondas. Com isso, a caracterização da direção do fluxo de energia é de extrema importância. Então, serão realizados histogramas direcionais de fluxo de energia médio anual e sazonal.

Outro aspecto a ser analisado é a sazonalidade do fluxo de energia, uma vez que o projeto de WECs são justificados em regiões com menores sazonalidades para que os equipamentos possam operar o máximo tempo possível e com pouca variação de produção de energia. Neste trabalho, são utilizados três parâmetros de avaliação da sazonalidade do fluxo de energia propostos por Cornett (2008): o coeficiente de variação (COV), que é a relação entre o desvio padrão (sd) e a média (μ) para a série temporal com intervalo entre pontos de 3 h (Eq. 4.5); a variabilidade mensal (MV), que é a relação da diferença entre o maior fluxo de energia entre os meses de análise ($P_{M\max}$) e o menor fluxo ($P_{M\min}$) com o fluxo de energia anual médio (P_{year}) (Eq. 4.6); e a variabilidade sazonal (SV), que é a relação da diferença entre o maior fluxo de energia entre as estações ($P_{S\max}$) e o menor fluxo ($P_{S\min}$) com o fluxo de energia anual médio (P_{year}) (Eq. 4.7).

$$COV = \frac{sd}{\mu} \quad (4.5)$$

$$MV = \frac{P_{M\max} - P_{M\min}}{P_{year}} \quad (4.6)$$

$$SV = \frac{P_{S\max} - P_{S\min}}{P_{year}} \quad (4.7)$$

4.2. Determinação da Potência Gerada por uma CAO

Nesta seção são descritas as características das simulações numéricas usadas para a determinação da potência gerada por uma CAO, através do modelo Fluent. Além disso, são mostradas as metodologias utilizadas para a determinação do tamanho ótimo da turbina do tipo Wells e da máxima potência gerada por uma CAO, instalado na região sul do Brasil, acoplada em um quebra-mar na profundidade de 14 m. As condições de contorno do batedor com absorção ativa e da turbina foram desenvolvidas e testadas por Didier e Neves (2012), Didier et al. (2012) Didier et

al. (2016). Nesse trabalho são utilizadas tais ferramentas com o intuito de aprimorar as análises e os resultados obtidos. Da mesma forma, a determinação da máxima potência e da turbina ótima é realizada através de um modelo simplificado desenvolvido e testado por Torres (2015).

4.2.1. Transformação das Ondas Espectrais em Monocromáticas

As ondas espectrais obtidas na isobatimetria de 14 m pelo modelo Mike 21 SW foram transformadas em ondas monocromáticas equivalentes para as simulações no modelo Fluent. Embora as últimas versões do modelo Fluent apresentem a possibilidade da inserção de um batedor de geração de ondas espectrais, os seus mecanismos de amortecimento das ondas, via praia numérica no final do canal, não permitem a simulação de conversores de energia das ondas na incidência de ondas espectrais. Além do mais, simulações com ondas espectrais incidentes sem a absorção ativa exigiria um domínio computacional extremamente extenso, pois é necessário um registro de pelo mínimo 15 min de simulação para esta situação.

No modelo Mike 21 SW o fluxo de energia (F_E) é calculado através da Eq. 3.32 e a altura significativa (H_s) é calculada através da Eq. 3.31. O modelo não fornece o valor do período de energia (T_e). Para a determinação deste parâmetro é utilizado a Eq. 3.34 que faz a relação entre F_E , H_s e T_e . Apesar das transformações das ondas espectrais em ondas monocromáticas trazerem algumas perdas das características da condição ondulatória local, o fluxo de energia contida nas ondas espectrais é mantido nas ondas monocromáticas equivalentes. Com o objetivo de utilizar uma onda característica monocromática com mesmo fluxo de energia da onda espectral, serão utilizados os parâmetros período de energia (T_e) e altura média quadrática (H_{rms}) da onda espectral como período (T) e altura (H) da onda monocromática equivalente (ver item 3.2.2).

Após a transformação das ondas espectrais em monocromáticas equivalentes em fluxo de energia, essas serão organizadas por faixa de período de energia (T_e) e altura média quadrática (H_{rms}) em uma matriz de ocorrência. Ondas com T_e menores que 4,5 s e maiores que 12,5 s serão desconsideradas, pois são consideradas situações extremas de calmaria e agitação ondulatória. Assim como, ondas com H_{rms} menores que 0,25 m e maiores que 3,25 m.

4.2.2. Geometria, Malha e Monitoramento

Para a simulação numérica hidrodinâmica e aerodinâmica da CAO no modelo Fluent utilizou-se a escala real, para evitar as distorções dos resultados devido aos efeitos de escala. Como a geometria do equipamento e das feições de fundo não possuem variações importantes na direção horizontal y , foram consideradas simulações bidimensionais. Sendo assim, o domínio consiste em um canal com incidência das ondas perpendicular a CAO. Os efeitos tridimensionais da reflexão

serão, também, desconsiderados utilizando um domínio bidimensional. Na Fig.4.5 é mostrado um esquema com a geometria, as condições de contorno e a posição das sondas de monitoramento.

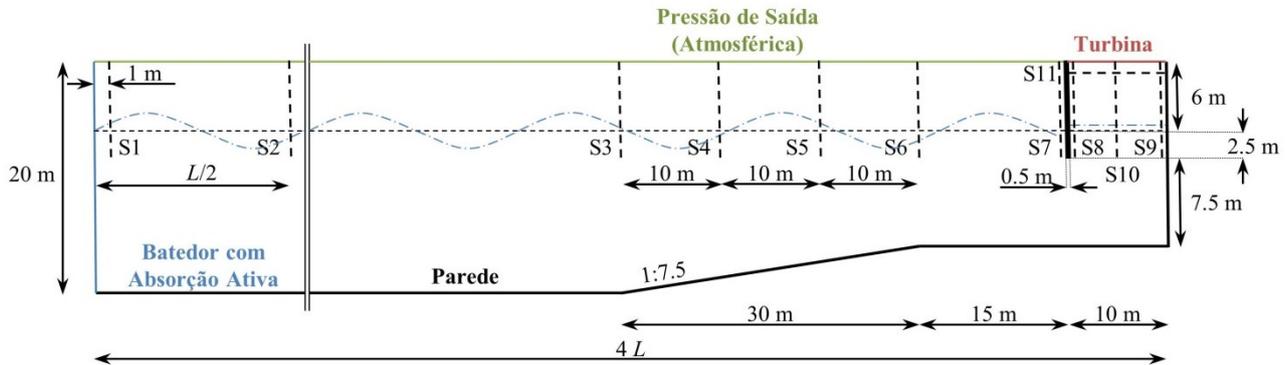


Figura 4.5 – Esquema com a geometria, condições de contorno e posição das sondas de monitoramento para as simulações hidrodinâmicas e aerodinâmicas da CAO.

O comprimento total do canal é fixado em quatro comprimentos de onda ($4L$) e a profundidade inicial do canal é de 14 m. O talude com 30 m de comprimento e inclinação 1:7,5 representa o talude da berma de equilíbrio necessária para a estabilidade do quebra-mar, conseqüentemente, para a estabilidade da CAO. Bermas de equilíbrio são necessárias em regiões onde o solo não possui capacidade de carga de suportar a pressão da estrutura assente sobre este. Com o objetivo de aumentar a área de distribuição da carga e reduzir a pressão sobre o solo, bermas de equilíbrio são construídas.

Nesse trabalho foi verificada a estabilidade da berma de equilíbrio proposta utilizando o modelo Plaxis v. 8.2 para um perfil de solo semelhante ao encontrado na desembocadura da Lagoa dos Patos e um quebra-mar com seção transversal semelhante aos molhes da barra do Porto do Rio Grande (Rabassa, 2010). Foi obtido um fator de segurança (FS) de 1,54 para a situação com berma de equilíbrio mostrada na Fig. 4.5, enquanto que o FS requerido é 1,50 (NBR 11682, 2009). Como o trabalho não possui enfoque no projeto estrutural e geotécnico da CAO, não serão apresentados detalhes dos resultados dessa avaliação no presente trabalho.

As dimensões utilizadas para câmara são as mesmas que foram obtidas por Teixeira et al. (2013) em seu estudo de otimização de uma CAO. Então, a câmara possui 10 m de comprimento, 10 m de largura e 16 m de altura. Embora sejam realizadas simulações bidimensionais, a largura da câmara é levada em conta para a determinação da potência por unidade de CAO. Dos 16 m de altura, considerando a ausência de ondas, 10 m estão abaixo da linha d'água e 6 m estão acima da linha d'água. A parede frontal da CAO possui espessura de 0,5 m e altura de 8,5 m, sendo que 2,5 m desses se encontram abaixo do nível médio.

Para a discretização do domínio computacional foram utilizadas malhas regulares de células quadriláteras. Na vertical, o domínio é dividido em 125 células, sendo que 50 dessas estão localizadas na região da variação do nível da elevação da superfície livre. Na horizontal, foram utilizadas 390 células, com tamanho máximo 70 células por comprimento de onda. No início do canal, perto da câmara e no interior da câmara foram realizados refinamentos da malha (Teixeira et al., 2013). Como o tamanho das células e a geometria do canal estão atrelados às ondas incidentes, foram realizadas 24 diferentes malhas para as ondas com períodos ($T = 5 - 12$ s) e alturas ($H = 1 - 3$ m). Com o objetivo de reduzir o número de malhas, foi realizada uma discretização vertical bem refinada na zona de elevação da superfície livre. Assim, as malhas para as ondas incidentes com $H = 1$ m, 2 m e 3 m serão também utilizadas para as ondas incidentes com $H = 0,5$ m, 1,5 m, e 2,5 m, respectivamente. Na Fig. 4.6 é mostrada a malha para os casos de ondas incidentes com $H = 0,5$ m e 1,0 m e $T = 5$ s.

Foram dispostas diversas sondas de monitoramento ao longo do canal de ondas com o objetivo de avaliar os parâmetros elevação de superfície livre, pressão e fluxo de volume (ver Fig. 4.5). Para o monitoramento da elevação da superfície livre, foram colocadas dez sondas verticais ao longo do domínio computacional. As sondas S1 e S2 estão situadas no início do canal a uma distância de 1 m e meio comprimento de onda ($L/2$) do batedor, respectivamente. As sondas S3, S4, S5 e S6 estão localizadas no talude da berma de equilíbrio e possuem espaçamento de 10 m entre elas. A sonda S7 se encontra junto à face externa da parede frontal da câmara e as sondas S8, S9 e S10 se encontram dentro da câmara junto à face interna da parede frontal, junto à parede posterior e no meio da câmara, respectivamente. Junto ao topo da CAO foi colocada uma superfície de controle horizontal, S11, para o monitoramento da pressão e do fluxo de volume através dessa superfície.

4.2.3. Condições de Contorno

As condições de contorno desempenham um papel fundamental nas simulações numéricas. Através delas são impostas as características das fronteiras do domínio computacional. Foram utilizadas quatro diferentes tipos de condições de contorno (Ver Fig. 4.5): No início do canal, foi imposta a condição de contorno de velocidade prescrita para a geração das ondas incidentes (linha azul); no fundo e nas paredes da CAO, com exceção do topo, foi aplicada a condição de contorno parede (linha preta); no topo do canal foi imposta a condição de contorno pressão de saída (linha verde) e no topo da câmara também foi aplicada uma pressão de saída (linha vermelha); entretanto com características diferentes da condição de contorno do topo do canal.

No início do canal, no batedor, foi aplicada a condição de contorno velocidade prescrita para a geração das ondas incidentes através de uma UDF (*User Defined Function*), onde são impostos os

perfis de velocidades horizontal e vertical e a posição da elevação da superfície livre. Nesse estudo foram utilizadas ondas monocromáticas lineares, apesar da maioria dos casos de incidência de ondas apresentarem uma característica de segunda ordem de Stokes. Esta situação não causa erros nas simulações, uma vez que o canal longo permite que as ondas se ajustem após a sua geração até o talude da berma de equilíbrio.

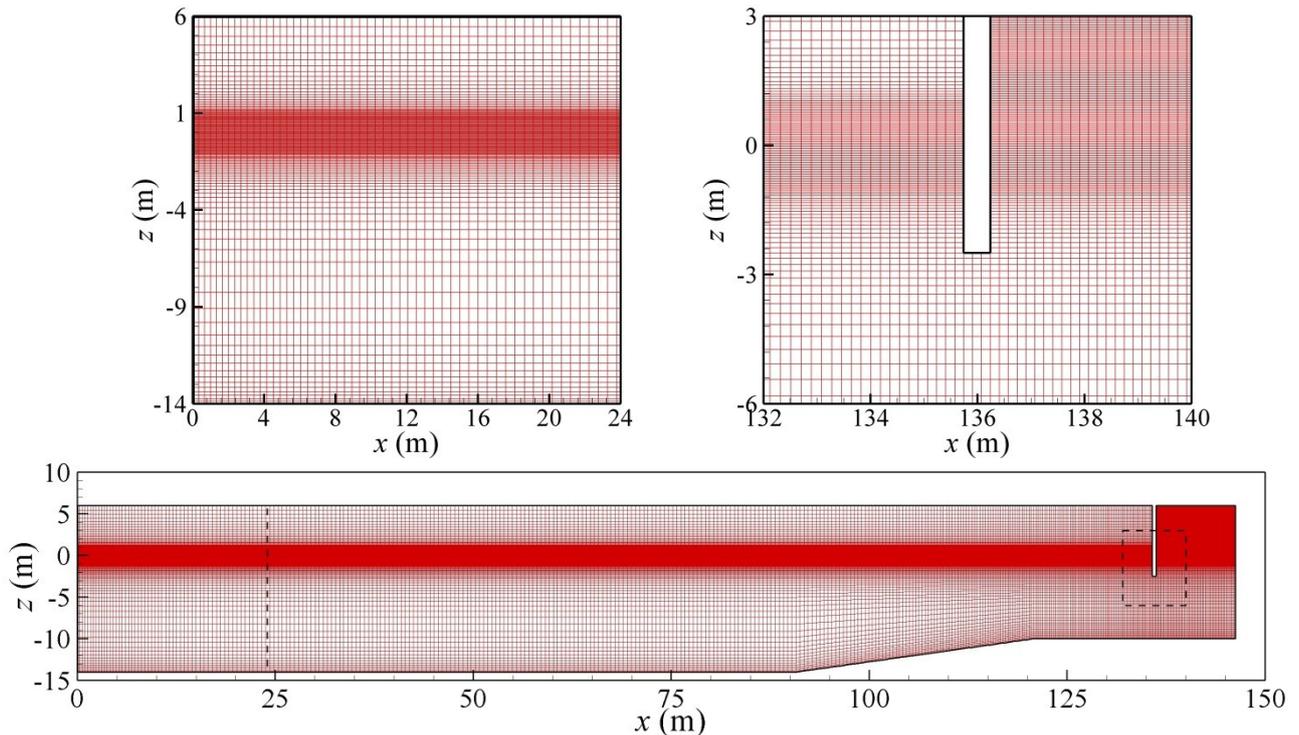


Figura 4.6 – Malha computacional e detalhes dos refinamentos no início do canal e ao redor da parede vertical da CAO para os casos das ondas incidentes com alturas $H = 0,5$ m e 1,0 m e período $T = 5$ s.

Foi utilizada absorção ativa no batedor para eliminar as ondas refletidas pela CAO, aumentar o tempo de validade da simulação numérica e reduzir o tamanho do domínio computacional. A metodologia aplicada para a absorção ativa no batedor numérico é semelhante à utilizada para a absorção ativa em modelos físicos. A elevação de superfície livre refletida (η_r) é estimada comparando a elevação de superfície alvo (η_{alvo}) com a elevação de superfície medida em frente do batedor (η_m), Eq. 4.8. Com o objetivo de anular a onda refletida, é aplicada uma velocidade de correção do batedor (U_r), baseado na teoria linear de ondas, em função da aceleração da gravidade (g), profundidade (h) e elevação de superfície livre da onda refletida, Eq. 4.9 (Schäffer e Klopman, 2000; Lara et al., 2010; Didier e Neves, 2012 e Higuera et al., 2013, Didier et al., 2016).

$$\eta_r = \eta_{alvo} - \eta_m \quad (4.8)$$

$$U_r = \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_r \quad (4.9)$$

No fundo do canal e nas paredes da CAO, com exceção do topo, foi aplicada a condição de contorno de parede. Nesses contornos é aplicada a condição de não deslizamento, ou seja, o fluido junto a esses contornos possui velocidade nula. No topo do canal utilizou-se a condição de contorno saída de pressão e foi aplicada uma pressão constante igual à atmosférica (101,325 kPa). Além disso, é permitido o fluxo de ar através dessa superfície.

No topo da CAO, foi aplicada a condição de contorno saída de pressão. Entretanto, ao invés da prescrição da pressão atmosférica ao longo desse contorno, foi imposta uma pressão variável no tempo através de uma UDF de acordo com a Eq. 4.10 (Didier et al., 2012).

$$\Delta p(t) = K'U(t) \quad (4.10)$$

onde: $\Delta p(t)$ é a variação de pressão em relação a atmosférica, K' é a relação entre a velocidade média e a perda de carga e $U(t)$ é a velocidade média ao longo do tempo no topo da CAO. No item 4.2.5 serão mostrados mais detalhes sobre a consideração da turbina na modelagem numérica.

4.2.4. Características das simulações

O Fluent é um modelo do tipo RANS que aplica a técnica dos volumes finitos para resolução das equações constituintes e o método VOF para rastreamento da posição da superfície livre. Foi utilizado o algoritmo SIMPLEC (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations - Consistent*) para o acoplamento pressão-velocidade. Os algoritmos SIMPLE e SIMPLEC usam a relação pressão e velocidade para forçar a convergência da equação da continuidade e para o cálculo dos campos de pressão do escoamento. Em problemas menos complexos, como escoamentos laminares onde a convergência é limitada pelo acoplamento pressão-velocidade, a convergência utilizando o método SIMPLEC é atingida antes (van Doormal e Raithby, 1984).

Para a discretização espacial da pressão foi utilizado o método PRESTO! (*PREssure STaggering Option*) que emprega um balanço discreto da continuidade para o escalonamento do volume de controle na face em que a pressão será computada. Na discretização espacial dos termos convectivos da equação da quantidade de movimento, foi utilizado o método de terceira ordem

MUSCL (*Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservations Laws*), combinando métodos de diferenças centrais e de segunda ordem a montante (Van Leer, 1979). Comparado com esquemas de segunda ordem a montante, os esquemas de terceira ordem MUSCL melhoraram a acurácia espacial para todos os tipos de malha reduzindo a difusão numérica.

O método *Geo-Reconstruct* que utiliza informações geométricas para rastreamento da posição da superfície livre foi usado para a discretização espacial da fração de volume. Apesar de apresentar uma maior acurácia, esse método demanda mais tempo computacional que os métodos de rastreamento da superfície livre através de equações algébricas. O método *Geo-Reconstruct* representa a interface entre dois fluidos através da abordagem linear por partes (*piecewise-linear approach*) assumindo que a interface entre dois fluidos tem uma inclinação linear em cada célula. Essa abordagem é mais precisa e pode ser aplicada em qualquer tipo de malha.

Para simulações transientes, as equações governantes são discretizadas também no tempo. Existem diferentes métodos (primeira ordem ou segunda ordem) e formas de avanço no tempo (iterativo e não iterativo). Nesse trabalho foi utilizada a formulação transiente de primeira ordem implícita para a discretização temporal com o método iterativo para avanço no tempo. O passo de tempo utilizado foi de $\Delta t = T / 640$. Esse passo de tempo garante um $CFL < 0,25$.

O modelo padrão $k-\varepsilon$ foi usado para lidar com os efeitos turbulentos dos escoamentos simulados. Este modelo é baseado em equações de transporte para a determinação da energia cinética turbulenta (k) e da taxa de dissipação (ε). Para a discretização da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação utilizou-se o método de terceira ordem MUSCL.

Os coeficientes de relaxação usados foram os que são padrão do modelo Fluent. Com objetivo de sintetizar as informações descritas nesse item, na Tab. 4.4 são mostrados os métodos utilizados para o controle da solução do modelo numérico.

Tabela 4.4 – Parâmetros e metodologias utilizadas para as simulações com o modelo Fluent.

Parâmetros	Método
Acoplamento pressão-velocidade	SIMPLEC
Pressão	PRESTO!
Quantidade de Movimento	Terceira ordem MUSCL
Fração de Volume	<i>Geo-Reconstruct</i>
Energia Cinética Turbulenta	Terceira ordem MUSCL
Taxa de Dissipação Turbulenta	Terceira ordem MUSCL
Formulação transiente	Primeira ordem implícito
Modelo Turbulência	$k-\varepsilon$

4.2.5. Modelagem da Turbina e dos Sistemas de Controle

A relação entre a pressão dentro da câmara e a vazão mássica afeta diretamente o acoplamento entre as partes aerodinâmicas e hidrodinâmicas em uma CAO. Para uma turbina do tipo Wells, essa relação é linear (Falcão e Justino, 1999; Sheng et al., 2014). Para esta turbina e qualquer outra turbo máquina, a potência, a vazão mássica e as diferenças de pressão são relacionadas com o tamanho do rotor e a velocidade de rotação deste. Essas relações podem ser expressas na forma adimensional para representar o comportamento de turbinas similares que possuem a mesma forma, mas tamanhos diferentes. Os parâmetros adimensionais são mostrados nas Eq. 4.11, 4.12 e 4.13.

$$\Psi = \frac{p - p_0}{\rho_* \omega^2 D^2} \quad (4.11)$$

$$\Phi = \frac{\dot{m}}{\rho_* \omega D^3} \quad (4.12)$$

$$\Pi = \frac{P_t}{\rho_* \omega^3 D^5} \quad (4.13)$$

onde: Ψ , Φ e Π são os parâmetros adimensionais de pressão, vazão mássica e potência, respectivamente, p é a pressão de ar na câmara, p_0 é a pressão atmosférica, ρ_* é a massa específica de referência, ω é velocidade de rotação da turbina, D é o diâmetro da turbina, \dot{m} é a vazão mássica na turbina e P_t é a potência mecânica da turbina. Curvas que relacionam os parâmetros adimensionais de vazão mássica com os de pressão e de potência mostram o comportamento de cada tipo de turbina a uma velocidade constante. Na Fig. 4.7 são mostradas as curvas para a turbina do tipo Wells instalada na planta de geração de energia de Pico (Falcão e Justino, 1999).

Através dessas curvas notam-se alguns aspectos típicos do comportamento de uma turbina do tipo Wells: (1) A relação entre os adimensionais de vazão mássica e de pressão é dada por $\Phi = K\Psi$, com $K = 0,6803$ para o caso da turbina da planta de geração de energia de Pico. (2) Para valores baixos do parâmetro adimensional de pressão o parâmetro adimensional de potência é negativo. (3) O parâmetro adimensional de potência máximo atinge o valor máximo ($\Pi = 0,00213$)

quando o adimensional do parâmetro de pressão possui valor de ($\Psi_{crit} = 0,067$). (4) A utilização de sistemas de válvulas de controle da pressão na câmara é uma maneira de evitar a operação da turbina em valores do parâmetro adimensional de pressão acima do Ψ_{crit} . (5) A relação característica da turbina (k_t) depende da velocidade de rotação (ω) e do seu diâmetro (D): $k_t = \rho_* \omega / KD$. Para diferentes valores de velocidade de rotação e diâmetros podem corresponder à mesma relação característica da turbina que é o único parâmetro adimensional utilizado que influencia o modelo aerodinâmico e hidrodinâmico simultaneamente (Torres et al., 2016).

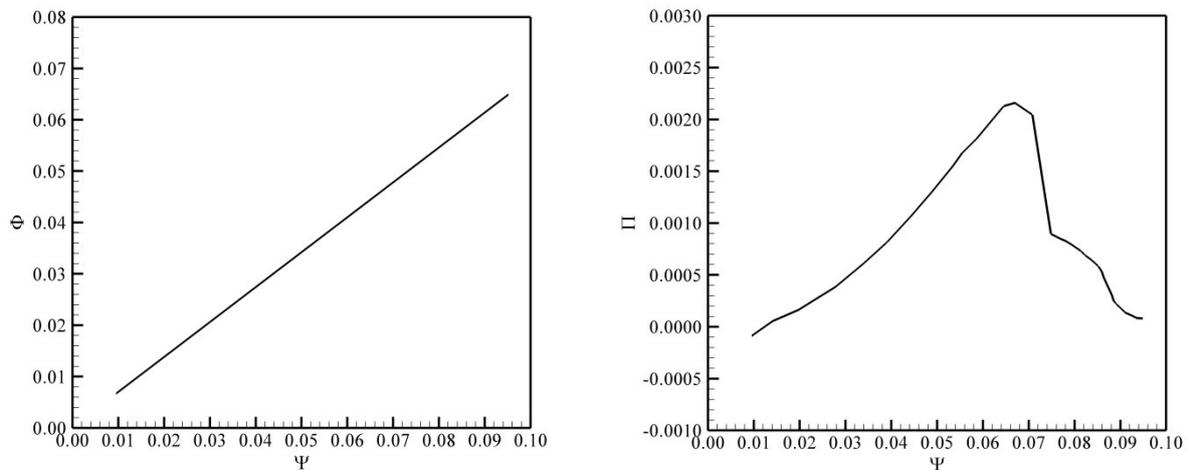


Figura 4.7 – Curvas de performance da turbina do tipo Wells instalada na planta de geração de energia de Pico (Falcão e Justino, 1999). (a) Parâmetro adimensional de pressão (Ψ) versus parâmetro adimensional de vazão mássica (Φ) e (b) parâmetro adimensional de pressão (Ψ) versus parâmetro adimensional de potência (Π).

4.2.6. Determinação do Diâmetro Ótimo e da Potência Gerada

Para determinação do diâmetro ótimo da turbina e da máxima potência gerada pela CAO acoplado em um quebra-mar, localizado na região sul do Brasil na isobatimétrica de 14 m, foi utilizado o modelo Exedito proposto por Torres (2015). Este modelo adota um movimento de pistão sólido para a reprodução da elevação da superfície dentro da câmara da CAO, considerando um movimento harmônico assim como a onda incidente.

O modelo Exedito utiliza a equação diferencial do modelo aerodinâmico da CAO proposta por Josset e Clément (2007), que, para um deslocamento da superfície livre, ocorre uma alteração de pressão dentro da câmara. Admite-se que a soma da resposta em elevação e pressão na CAO é constante, independente da relação característica da turbina. Então, é definido um fator de amplificação constante, para cada caso de incidência de onda, definido pela relação entre a soma da

resposta em altura e pressão e a altura da onda incidente (Torres, 2015).

Como o fator de amplificação é a ligação entre a onda incidente e a resposta do dispositivo CAO, é necessária a aferição do modelo para cada onda incidente no dispositivo com determinada relação característica da turbina. A aferição é realizada com as séries temporais de pressão obtidas através da simulação usando o Fluent. Após aferido, o modelo determina a potência gerada para turbinas similares, com diferentes diâmetros e velocidades de rotação, levando em conta o sistema de controle de pressão dentro da câmara (Torres, 2015).

A potência mecânica da turbina (P_t) é determinada através das curvas de performance da turbina, Fig. 4.7. Com os valores de pressão manométrica, calcula-se a pressão adimensional Ψ para cada instante de tempo. Através da relação $\Psi(\Pi)$, é determinada a potência mecânica da turbina. A média no período da potência mecânica é dada pela Eq.4.14.

$$\bar{P}_t = \frac{1}{T} \int_T P_t dt \quad (4.14)$$

Vale destacar que as simulações no modelo Expedito são bem mais rápidas que as simulações no Fluent. Além do mais, os resultados obtidos pelo modelo utilizado possuem grande concordância com os resultados obtidos através de modelos baseados nas equações de Navier-Stokes (Torres, 2015). Então, nesse estudo será realizada apenas a simulação para a aferição do modelo expedito através do Fluent. Com o modelo aferido, será determinada a potência gerada pela CAO com turbinas de diferentes tamanhos e velocidades de rotação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, os resultados obtidos através da aferição e validação do modelo numérico Mike 21 SW são discutidos e analisados. Após os resultados da avaliação e caracterização do potencial energético no sul do Brasil são mostrados e analisados. Por fim, são expostos os resultados da análise do desempenho de um equipamento conversor de energia das ondas do tipo CAO acoplado em um quebra-mar na profundidade de 14 m.

5.1. Aferição e Validação do Modelo Mike 21 SW

Para a aferição do modelo numérico Mike 21 SW, comparam-se os valores simulados de H_s , T_p e D_p com valores medidos por um ondógrafo direcional (WRD) e um ADV fixados, respectivamente, nas profundidades de 25 m e 12 m. Devido ao grande volume de dados referente às séries temporais, será apresentado apenas o diagrama de barras com a representação dos parâmetros estatísticos utilizados para a quantificação dos resultados simulados (Fig. 5.1). As análises contidas no diagrama de barras referem-se às mesmas descritas na Tab. 4.2.

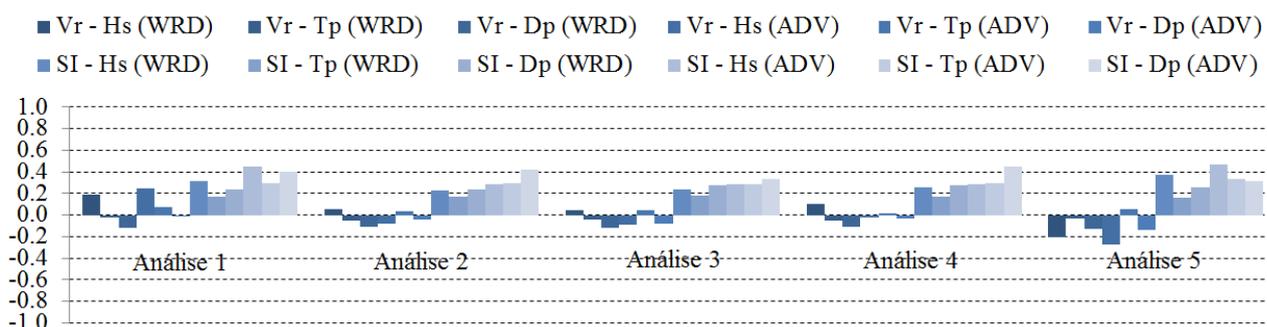


Figura 5.1 – Análise estatística para a aferição do modelo.

Analisando o diagrama de barras, percebe-se que a Análise 3 foi a que apresentou os menores erros na fase de aferição do modelo. Comparando o diagrama de barras da Análise 5 (sem a geração de ondas locais pelo vento) com as demais que consideram a geração de ondas pelo vento local, nota-se que o erro na previsão de H_s é alto e o V_r indica uma grande subestimação deste parâmetro. Então, a não ativação da geração local de ondas pelo vento traz erros significativos para a previsão da H_s na região de estudo, mesmo que o domínio limite a pista de atuação do vento.

Comparando a Análise 2 (aferição da dissipação com atrito no fundo) com a Análise 1 (sem dissipação por atrito no fundo), percebe-se que a Análise 2 apresenta menores erros. Indicando que a aferição da dissipação do atrito no fundo é necessária para a qualidade da simulação da propagação de ondas na região de estudo. Tal importância se deve as características da plataforma

continental local: extensa e de baixa declividade.

Na Análise 2 conclui-se que a utilização da metodologia de dissipação de atrito com o fundo que considera o coeficiente de rugosidade como uma função do tamanho das formas de fundo determinado através de expressões empíricas traz melhores resultados. O caso que apresentou menor erro na fase de aferição da dissipação por atrito no fundo foi o com o diâmetro mediano do grão de $d_{50} = 0,0625$ mm. Segundo Calliari et al. (2009), a classificação granulométrica dos sedimentos na região vai de areia fina a silte, em alguns pontos, principalmente perto da desembocadura da Lagoa dos Patos, são encontrados bolsões de sedimentos coesivos. Então, o valor encontrado para o grão mediano está dentro da faixa granulométrica existente no local de estudo.

Comparando a Análise 2 (formulação temporal quase estacionária) e a Análise 3 (formulação temporal não estacionária), verifica-se que os erros obtidos em ambas as análises são semelhantes, embora a Análise 3 apresente resultados levemente melhores, mostrando que a formulação temporal de propagação e geração de ondas não influencia substancialmente os resultados modelados. Isso se deve, principalmente, ao tempo de residência das ondas no domínio computacional que é menor que o tempo de mudança das forçantes nas condições de contorno. Além do mais, o intervalo de três horas, associado à limitação espacial imposta pelo domínio, faz com que a geração de ondas localmente entre em situação de equilíbrio, na maioria das vezes, antes da mudança da condição de contorno.

Comparando a Análise 2 (vento com variação espacial) com a Análise 4 (vento constante espacialmente), nota-se que a Análise 2 apresentou melhores resultados, embora a diferença entre ambas seja pequena. Tal diferença, embora tênue, é notada devido à variação da direção e velocidade do vento espacialmente que em alguns instantes é considerável (Ver Fig. 4.3 b).

Na Fig. 5.2 é apresentada a comparação entre as séries temporais de H_s , T_p e D_p simuladas na Análise 3, que foi a que apresentou melhor desempenho na fase de aferição do modelo, com as medidas por um ondógrafo direcional fixado na profundidade de 25 m no período de 15 maio a 25 junho de 2005. Percebe-se uma boa concordância entre os valores simulados de H_s , T_p e D_p com os valores medidos por um ondógrafo direcional. É notada uma grande oscilação do período de pico e da direção de pico. Essa oscilação deve-se a bimodalidade de mares, ou seja, pela presença consecutiva de dois tipos de mares, ora com maior energia das ondulações de maior período, ora com maior energia das vagas de menor período.

Para uma melhor quantificação dos resultados obtidos também foram comparados alguns espectros de frequência característicos medidos pelo ondógrafo direcional simulados. Foi escolhido os espectros dos dias 05/06/2005 as 12:00 h, 14/06/2005 as 21:00 h e 20/06/2005 as 15:00 h,

representando uma situação de pequena, grande e moderada agitação ondulatória, respectivamente (Fig. 5.3). Para avaliar a influência da geração de ondas localmente serão mostrados os espectros da simulação com (Análise 3) e sem (Análise 5) a consideração do vento local.

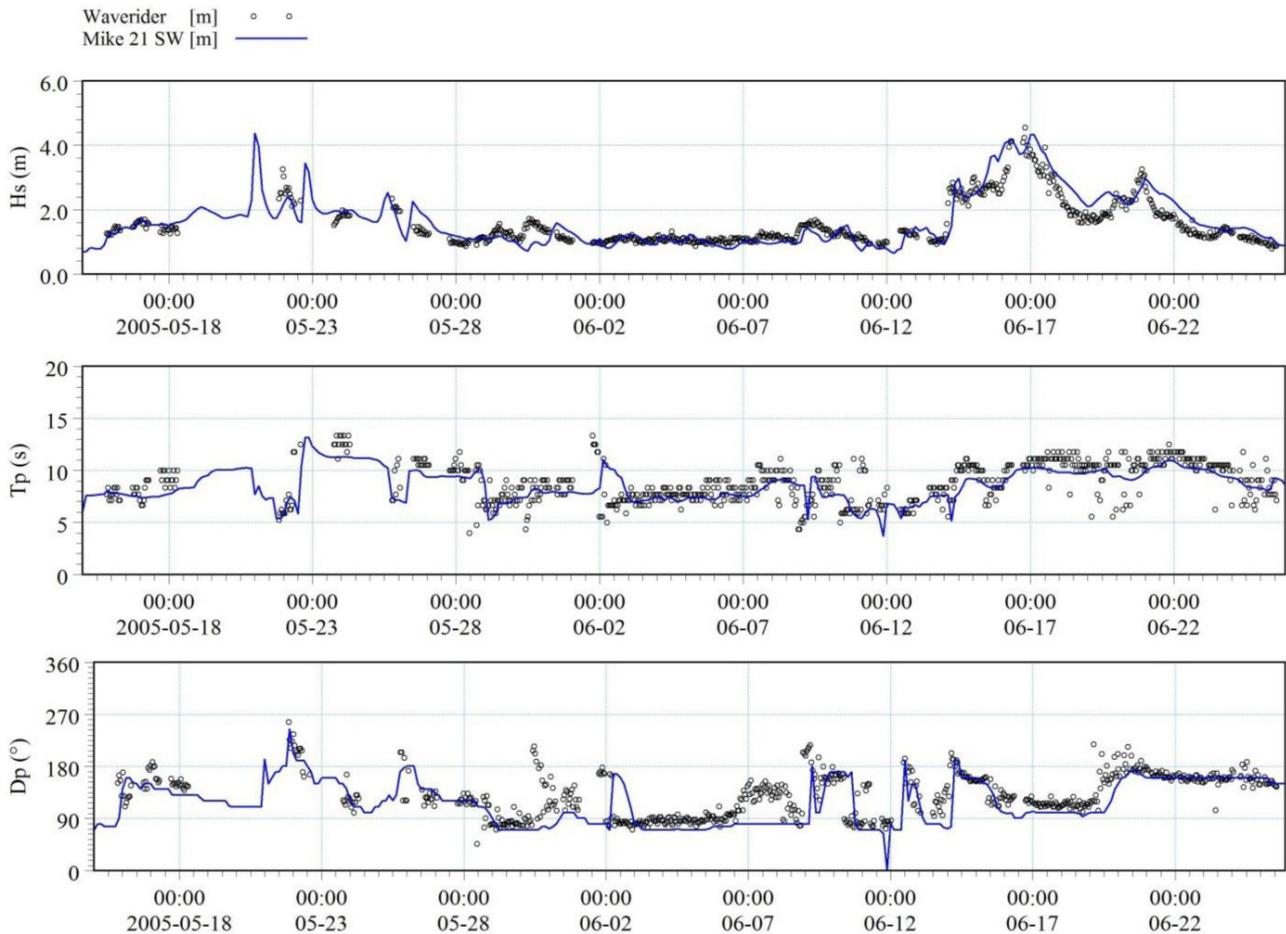


Figura 5.2 – Comparação entre os valores simulados na Análise 3 de H_s , T_p e D_p e os medidos pelo ondógrafo direcional.

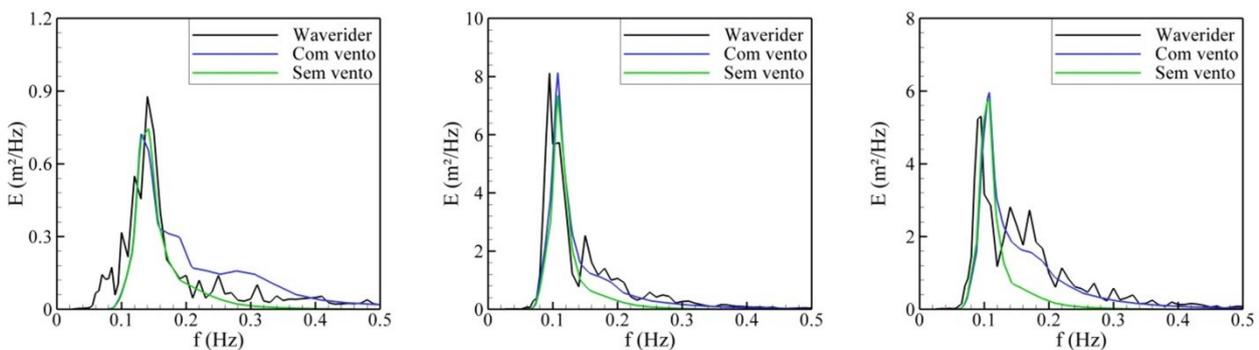


Figura 5.3 – Comparação entre os espectros de frequência característicos medidos e simulados.

Nota-se, na Fig. 5.3, uma boa concordância entre os espectros de frequência característicos

na Análise 3 (Com vento) e os medidos, em todos os instantes. Tratando-se dos espectros de frequência encontrados através da Análise 5 (Sem vento), com exceção do primeiro caso em que se obteve uma boa proximidade entre os espectros medido e simulado em todas as frequências, verifica-se que, em geral, há uma concordância apenas das frequências mais baixas que representam as ondulações, enquanto a energia contida nas frequências mais altas, que representam as vagas, não são captadas devido a não inclusão da geração de ondas pelo vento local.

Em alguns instantes, como, por exemplo, no terceiro caso da Fig. 5.3, a parcela de energia presente nas frequências altas é representativa e tal energia se dá devido à geração de ondas pelo vento local. Então, a não inclusão da geração de ondas pelo vento local traz erros significativos na previsão da altura significativa, que em última análise representa a soma de energia contida nas várias frequências ondulatorias. Devido à utilização de um espectro teórico na condição de contorno com fator de aprimoramento de pico constante em todas as ondas incidentes, os espectros sem a utilização da geração do vento local possuem mesma forma de distribuição de energia.

Na Fig. 5.4 são mostradas as séries temporais de H_s , T_p e D_p simuladas na Análise 3 e as medidas por um ADV fixado na profundidade de 12 m no período de 27 de junho a 27 de julho de 2005. Assim como o ocorrido na posição do ondógrafo direcional, percebe-se uma boa concordância entre os valores simulados de H_s , T_p e D_p com os valores medidos pelo ADV, evidenciando que o modelo Mike 21 SW está aferido na região de interesse.

Com o modelo aferido em medições de curto período, será verificado o desempenho do Mike 21 SW em previsões de longo período. Para isso, serão comparados os valores de H_s , T_p e D_p simulados com os medidos por um ondógrafo direcional fixado na profundidade de 15 m entre os anos de 1996 a 1999. Serão utilizadas as metodologias da Análise 3 para a simulação de longo período, que são: geração de ondas por ação do vento local variando espacialmente; regime não estacionário; separação de mares aplicando a dissipação por *whitecapping* apenas nas frequências mais altas; e dissipação por atrito no fundo com o coeficiente de rugosidade determinado por formulações empíricas adotando o diâmetro mediano de grão de $d_{50} = 0,0625$ mm.

Para a validação do modelo numérico, foram analisados quatro anos de dados, com falhas. Devido ao grande volume de dados, em vez das séries temporais, serão apresentados os diagramas de dispersão entre os valores simulados e os medidos de H_s , T_p e D_p por um ondógrafo direcional fixado na profundidade de 15 m entre os anos de 1996 a 1999 (Fig. 5.5). Nesses diagramas, os pontos representam um par ordenado de valores observados e medidos no mesmo instante, a linha em vermelho representa a situação ideal onde todos os pontos estariam em uma

situação que os valores simulados fossem exatamente iguais aos valores medidos, já a linha em preto representa a inclinação média quadrática entre os valores medidos e simulados, por fim as cores representam a repetitividade de ocorrência dos pontos na mesma localização.

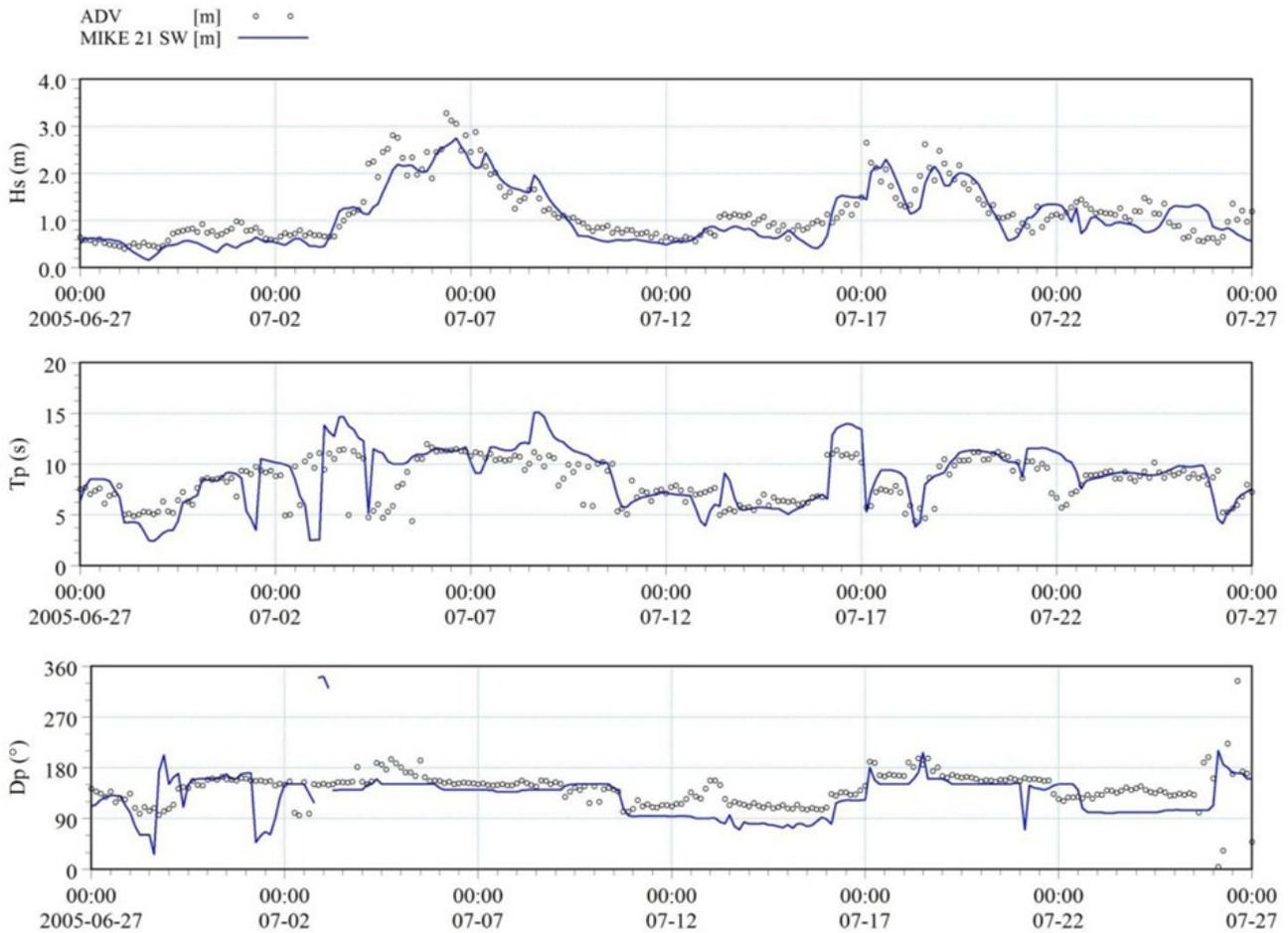


Figura 5.4 – Comparação entre os valores dos parâmetros H_s , T_p e D_p simulados na Análise e os medidos pelo ADV.

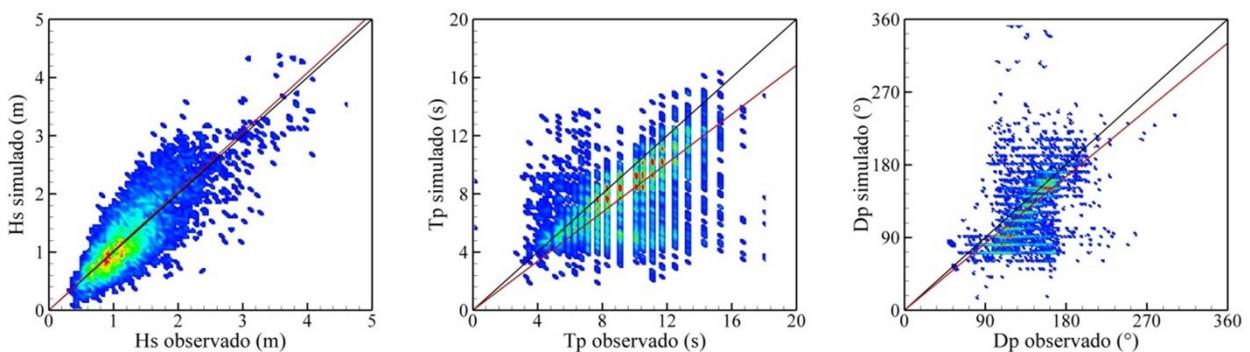


Figura 5.5 – Diagramas de dispersão para H_s , T_p e D_p entre os anos de 1996 a 1999.

Através dos diagramas de dispersão percebe-se que o modelo consegue reproduzir bem as condições ondulatórias medidas nesse período. Observando o diagrama de dispersão para a H_s , nota-se que a inclinação média quadrática se aproxima muito da reta com a inclinação de 45° que é a inclinação ideal. Além do mais, constatou-se que a dispersão dos pontos ao redor da reta ideal é pequena evidenciando a qualidade dos valores modelados.

Tratando dos parâmetros T_p e D_p , os diagramas de dispersão com formato retangular dos pontos evidenciam a bimodalidade de mares presente na região. Em mares bimodais, existem dois picos de energia, em alguns casos, o modelo prevê o pico menos/mais energético em vez do mais/menos energético. Além do mais, a direção do período mais energética pode estar associada a uma direção diferente do período com energia secundária. Por isso, ambos os diagramas apresentam a mesma forma de distribuição dos pontos. Verificou-se também que tanto D_p quanto T_p simulados, em média, são levemente menores que os medidos.

Da análise estatística realizada para a quantificação dos resultados simulados entre os anos de 1996 a 1999, obteve-se um V_r de -0,030, -0,162 e -0,110 para H_s , T_p e D_p e um SI de 0,274, 0,302 e 0,257 para H_s , T_p e D_p , mostrando que o modelo conseguiu reproduzir as condições ondulatórias, durante esse período, com elevada qualidade. Comparando os valores obtidos na análise estatística desse trabalho com trabalhos semelhantes (Liberti et al., 2013; Gonçalves et al., 2014; Appendine et al., 2015; Alonso et al., 2015; Kamranzad et al., 2016; Jadidoleslam et al., 2016), percebe-se que as diferenças entre as medições e as simulações encontradas são aceitáveis. Com isso, conclui-se que o modelo Mike 21 SW, após aferido e validado, é capaz de realizar a reconstituição e a previsão da agitação ondulatória com boa precisão.

5.2. Avaliação e Caracterização do Potencial Energético

Com o modelo aferido e validado, foram reconstituídos dez anos de agitação ondulatória (1997 – 2006) para a avaliação e caracterização do potencial energético ondulatório local. Foram analisados, em detalhe, três pontos, localizados na isobatimétrica de 14 m, em frente à Querência (QUE), Cassino (CAS) e São José do Norte (SJN), bem como um ponto em offshore (OFF), a 80 m de profundidade para a comparação das características do potencial energético existente em águas profundas com o disponível em águas intermediárias.

Na Fig. 5.6 é mostrada a distribuição do módulo do fluxo de energia médio no domínio computacional e o módulo do fluxo de energia médio mensal nos três pontos em águas intermediárias e no ponto em águas profundas. Como o fluxo de energia é uma grandeza vetorial, para referir apenas a seu módulo utilizaremos a palavra potência. A potência média anual para os

pontos localizados em águas intermediárias são de 6,3 kW/m (QUE), 6,0 kW/m (CAS) e 6,7 kW/m (SJN), já em águas profundas (OFF) é de 22,3 kW/m.

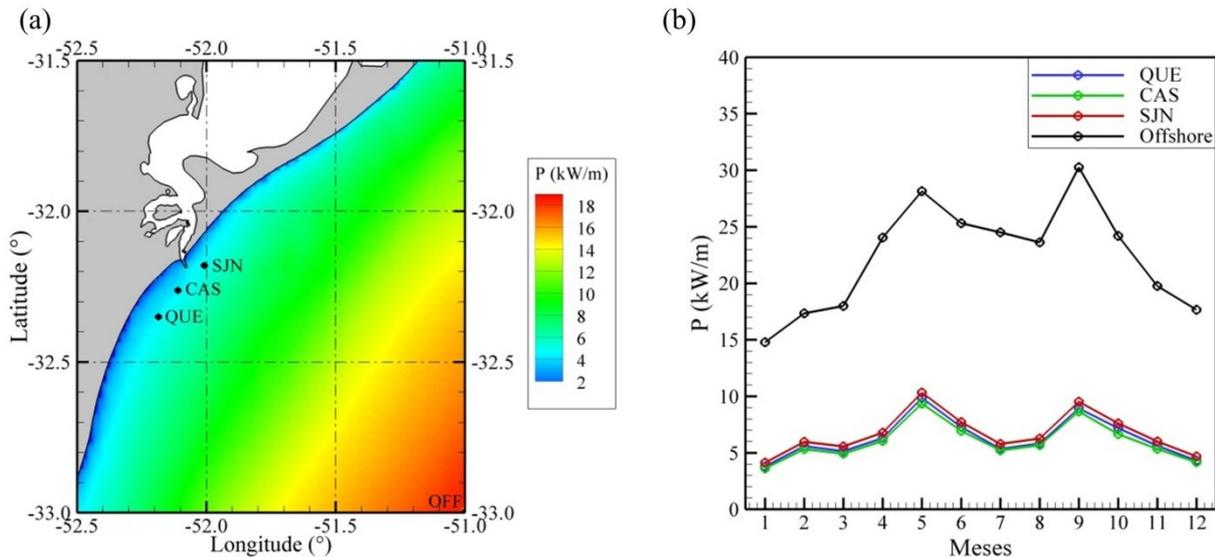


Figura 5.6 – Distribuição da potência média das ondas na região de interesse (a) e potência média mensal nos pontos selecionados (b) para dez anos de análise (1997 – 2006).

A atenuação da potência das ondas de águas profundas para águas intermediárias se deve, principalmente, a dois processos sofridos pelas ondas à medida que elas se aproximam da costa: a refração e a dissipação por atrito no fundo. As direções principais de incidência de ondas em águas profundas são de ondulações de sul e de vagas de este-nordeste (Fig. 4.2), enquanto que a direção normal da costa é sudeste (Fig. 4.4). Tais características, aliada a uma plataforma suave (sem a presença de grandes bancos e fossas), faz com que o processo de refração diminua consideravelmente a densidade de energia das ondas com incidência oblíqua a direção normal à praia. A outra parcela de energia é dissipada pelo atrito no fundo, que é amplificado por uma plataforma continental de grande extensão e pequena inclinação.

Através da distribuição mensal da potência nos pontos selecionados, percebe-se que os meses de maio (fim do outono) e setembro (início da primavera) são os que apresentaram maiores potências, por outro lado, os meses de janeiro e dezembro (verão) são os que apresentam as menores potências. Com o objetivo de estudar a variabilidade do potencial energético das ondas no local de estudo, foram determinados os seguintes parâmetros: COV , MV e SV (Tab. 5.1). Os valores dos parâmetros utilizados para a determinação da variabilidade mostram que em águas profundas existe uma irregularidade moderada do potencial comparado a outras regiões do mundo, como já reportado por Cornett (2008) em seu estudo global. Nos pontos em águas intermediárias, os

parâmetros são semelhantes aos encontrados por Alonso et al. (2015), na região costeira do Uruguai, e mostraram uma maior variabilidade da potência em relação ao ponto de águas profundas. A variabilidade por estação em águas intermediárias, medido pelo parâmetro SV , sofre um aumento pequeno, em torno de 16% em águas profundas. Por outro lado, os parâmetros que medem as variabilidades mensais e anuais têm valores muito acima daqueles de águas profundas, mostrando aumentos de 38% e 52% para MV e COV , respectivamente.

Tabela 5.1 – Avaliação da variabilidade da potência

Estação	QUE	CAS	SJN	OFF
COV	1,46	1,44	1,41	0,94
MV	0,97	0,96	0,93	0,69
SV	0,44	0,43	0,42	0,37

Embora exista uma maior potência em águas profundas e uma menor variabilidade desta, os custos de instalação, manutenção e operação em águas profundas são significativamente maiores do que em águas intermediárias. Por esta razão, a escolha da região mais adequada para instalação de WECs deve ser feita com grande cautela, baseando-se, não apenas em locais de maior potência, mas, também, levando em conta estudos de viabilidade econômica de um futuro projeto.

Observa-se que, para águas intermediárias, todos os parâmetros de variabilidade obtidos para SJN são mais favoráveis em relação aos outros pontos, uma vez que são levemente menores. Aliado ao fato de que o fluxo médio de energia é um pouco maior que o dos outros pontos. Com isso, pode-se concluir que o ponto de SJN é o mais adequado, dentre os três escolhidos, para a instalação de dispositivos de extração de energia das ondas.

Na Fig. 5.7 e 5.8 são mostrados os histogramas direcionais do fluxo de energia (rosas de potência) anual e sazonal para o ponto de SJN, localizado a 14 m de profundidade, e em offshore, a 80 m de profundidade. As rosas de potência mostram claramente a atenuação da energia em águas intermediárias em relação à offshore. As direções predominantes de incidência das ondas em águas profundas são de sul (S) e este-nordeste (ENE). Já em águas intermediárias são de sul-sudeste (SSE) e de este (E). As diferenças das direções predominantes de incidência são devido ao processo de refração das ondas, que tende a direcioná-las perpendicularmente à costa. Além disso, como já observado, a refração e a dissipação por atrito no fundo são responsáveis pelo decaimento do fluxo de energia em águas intermediárias.

Ressalta-se que a escolha do dispositivo mais adequado para a região, também, deve levar em conta a variabilidade da direção das ondas. Enquanto que, para os dispositivos concebidos para

capturar a energia das ondas de qualquer direção, dispositivos com simetria axial, as variações da direção principal não influenciam seus desempenhos. Porém, o outro grupo de dispositivos é sensível às mudanças da direção de incidência das ondas, necessitando um estudo específico da variabilidade direcional.

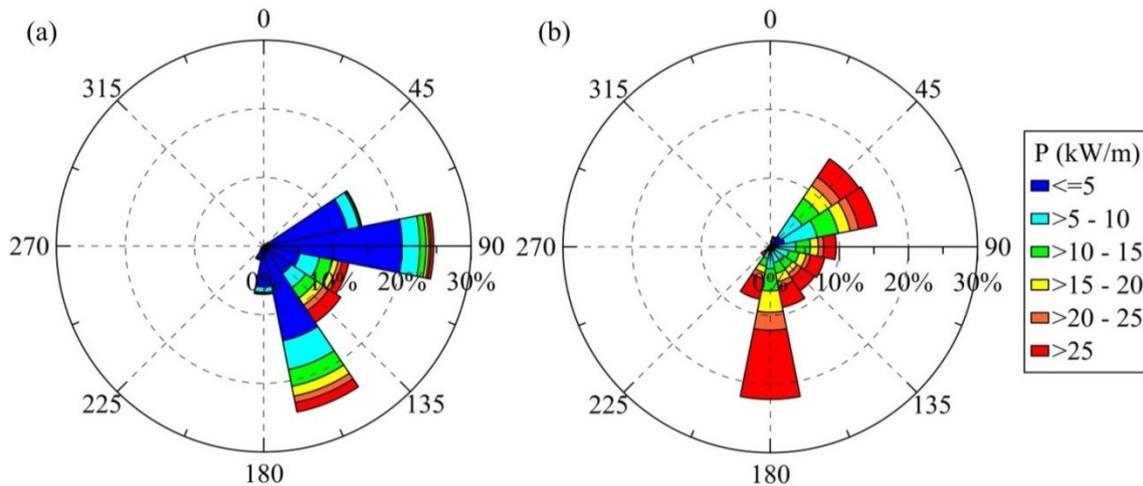


Figura 5.7 – Histogramas direcionais do fluxo de energia médio anual para os pontos de SJN (a) e OFF (b).

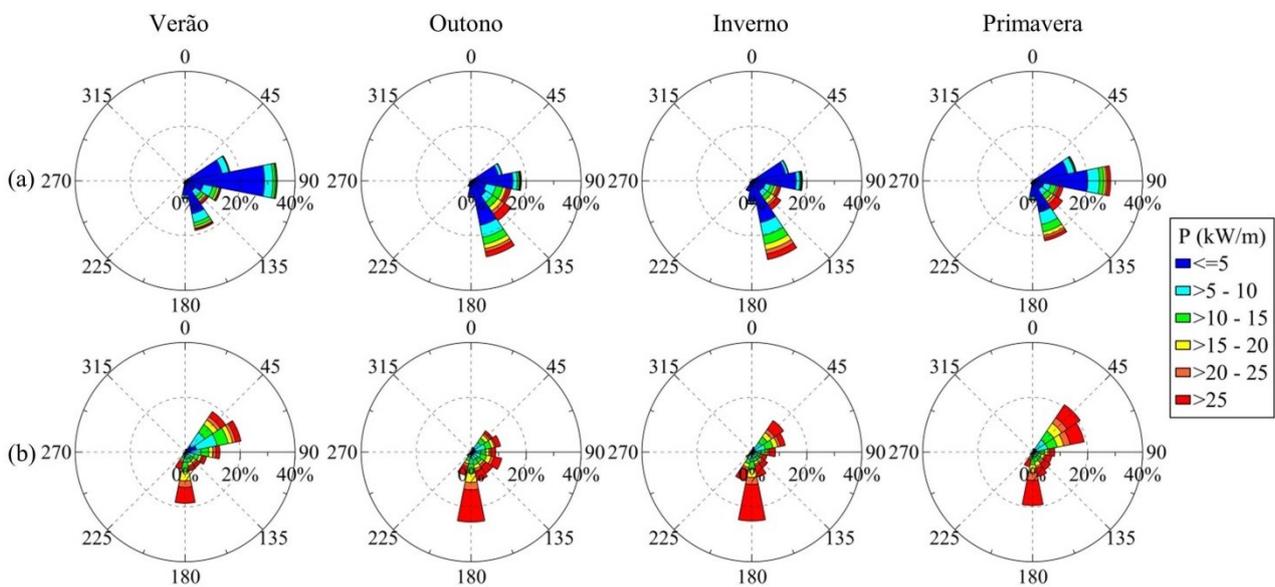


Figura 5.8 – Histogramas direcionais do fluxo de energia sazonais para os pontos de SJN (a) e OFF (b).

Tratando-se dos histogramas direcionais sazonais, no verão e na primavera, a direção principal de incidência é NE em águas profundas e E em águas intermediárias. Já no inverno e no outono, a incidência principal das ondas é de S em águas profundas e SSE em águas intermediárias. As ondas do quadrante norte-este (N-E) possuem menores potências que as ondas do quadrante

sul-este (S-E), isso está relacionado aos processos de formação dos dois sistemas principais de incidência das ondas. Enquanto que as ondas do quadrante N-E são geradas localmente devido à ação do vento local, as ondas do quadrante S-E são geradas por tempestades remotas associadas à passagem de frentes frias.

Na Fig. 5.9 são mostrados os diagramas de densidade de energia média anual em função da H_s e do T_e para os pontos de SJN e offshore. Observa-se que em águas intermediárias, a concentração de potência está distribuída em duas faixas de H_s e T_e bem distintas. A primeira faixa, mais energética, com H_s e T_e de aproximadamente 1 m e 5 s, respectivamente. Já a segunda, menos energética, porém mais abrangente, com H_s e T_e de aproximadamente 2,5 m e 10 s, respectivamente. Por outro lado, em águas profundas, a maior concentração de potência está definida entre os intervalos de 2 m a 4 m para a H_s e 6 s a 10 s para o T_e .

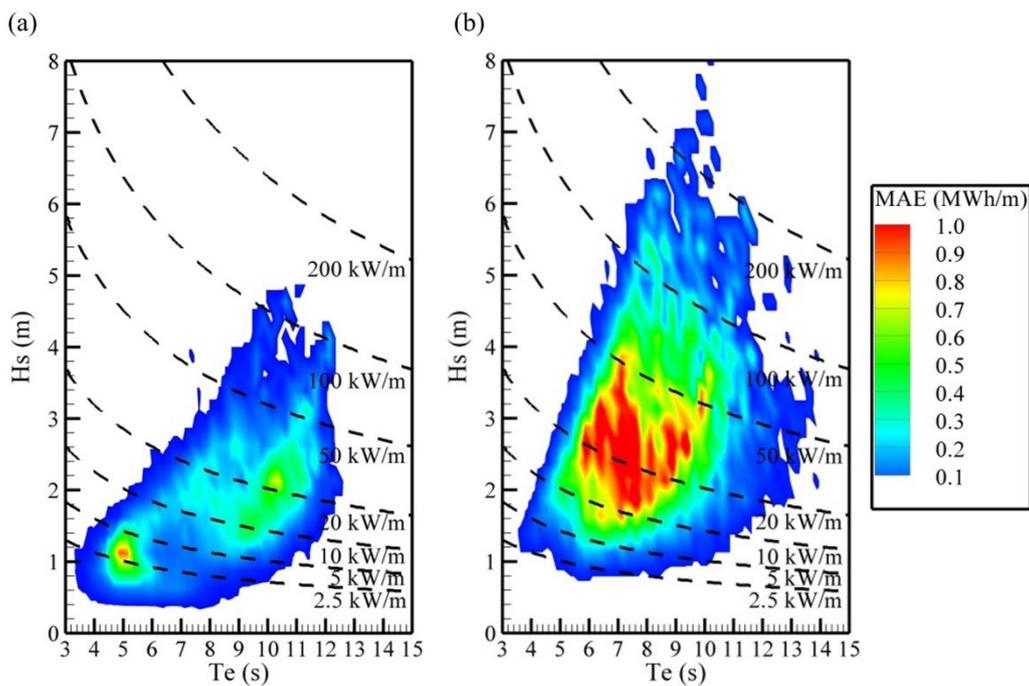


Figura 5.9 – Diagramas de densidade de potência média anual para o ponto SJN (a) e OFF (b).

A porcentagem de ocorrência por faixa de H_s e T_e é mostrada na Tab. 5.2 para o ponto SJN. Nota-se que a maior ocorrência está entre $H_s \sim 0,5 - 1,5$ m e $T_e \sim 5 - 6$ s, mesma faixa de concentração de potência da Fig. 5.9 a. Porém, a outra faixa com concentração de potência ($T_e \sim 10$ s e $H_s \sim 2,0$ m), apresenta uma pequena ocorrência dessa condição ondulatória. Entretanto, como a potência associada a essa condição de mar é elevada (~ 20 kW/m), mesmo com pequena ocorrência, a potência associada a essa faixa de H_s e T_e é equivalente a potência gerada

na faixa de H_s e T_e de maior ocorrência.

Tabela 5.2 – Porcentagem de ocorrência da agitação ondulatória por faixa de H_s e T_e .

H_s (m) \ T_e (s)	< 4.5	4.5 - 5.5	5.5 - 6.5	6.5 - 7.5	7.5 - 8.5	8.5 - 9.5	9.5 - 10.5	10.5 - 11.5	11.5 - 12.5	> 12.5
< 0.25	0.17	0.07	0.08	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25 - 0.75	3.68	5.40	5.36	4.57	2.24	0.63	0.13	0.02	0.00	0.00
0.75 - 1.25	3.29	18.15	10.57	4.03	3.24	2.13	0.91	0.13	0.01	0.00
1.25 - 1.75	0.20	4.12	4.17	2.23	2.32	3.66	2.73	0.77	0.05	0.00
1.75 - 2.25	0.00	0.06	0.66	1.48	1.74	1.39	2.25	1.38	0.21	0.00
2.25 - 2.75	0.00	0.00	0.01	0.29	0.78	0.76	0.89	0.88	0.31	0.00
2.75 - 3.25	0.00	0.00	0.00	0.01	0.14	0.30	0.21	0.45	0.10	0.00
3.25 - 3.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06	0.10	0.12	0.07	0.00
3.75 - 4.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.03	0.07	0.00
> 4.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00

5.3. Determinação da Potência Gerada por uma CAO

Para a determinação da potência gerada por uma CAO acoplada em um quebra-mar na profundidade de 14 m, as ondas incidentes espectrais mostradas na Tab. 5.2 foram transformadas em ondas monocromáticas com fluxo de energia equivalente. Para isso, foram usados os parâmetros H_{rms} e T_e para representar a H e o T da onda monocromática equivalente (ver item 4.2.1). Na Tab. 5.3 é mostrada a porcentagem de ocorrência por faixa de H_{rms} e T_e descartados os eventos extremos de calmarias e tempestades.

Tabela 5.3 – Porcentagem de ocorrência da agitação ondulatória por faixa de H_{rms} e T_e .

H_{rms} (m) \ T_e (s)	5	6	7	8	9	10	11	12
0.5	18.31	14.01	8.11	4.34	1.72	0.52	0.07	0.00
1.0	11.67	7.79	3.62	4.14	5.32	3.67	0.99	0.07
1.5	0.06	0.65	1.76	2.31	1.79	2.94	2.02	0.38
2.0	0.00	0.00	0.09	0.50	0.77	0.58	0.82	0.28
2.5	0.00	0.00	0.01	0.02	0.08	0.15	0.17	0.11
3.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06	0.03	0.06

Percebe-se que a maior ocorrência de ondas é de H_{rms} e T_e baixos, entretanto a potência associada a esse tipo de onda é extremamente baixa. Enquanto que, em ondas com H_{rms} e T_e maiores, a potência também é maior. Na Tab. 5.4 é mostrada a porcentagem de potência por faixa de H_{rms} e T_e . Nota-se que apesar de maior ocorrência, a porcentagem de potência associada às ondas de $H_{rms} = 0,5$ m e $T_e = 5$ s é pequena. Por outro lado, a porcentagem de potência associada à onda de $H_{rms} = 1,5$ m e $T_e = 10$ s é elevada, evidenciando que a potência associada à onda incidente é tão importante quanto a sua ocorrência.

Tabela 5.4 – Porcentagem de potência por faixa de H_{rms} e T_e .

H_{rms} (m) \ T_e (s)	5	6	7	8	9	10	11	12
0.5	3.08	2.83	1.91	1.17	0.52	0.17	0.03	0.00
1.0	7.85	6.30	3.41	4.46	6.44	4.94	1.47	0.12
1.5	0.10	1.18	3.72	5.59	4.88	8.89	6.74	1.39
2.0	0.00	0.01	0.34	2.16	3.75	3.13	4.87	1.80
2.5	0.00	0.00	0.04	0.15	0.59	1.22	1.55	1.09
3.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.68	0.45	0.87

A turbina ótima a ser usada na CAO é obtida primeiramente simulando as ondas com porcentagem de ocorrência não nula no modelo Fluent para fins de aferição do modelo Expedito e, depois, as simulações do modelo Expedito permitem escolher a turbina adequada. Para a aferição do modelo expedito, foram utilizadas as relações características da turbina (k_t) que proporcionam a máxima potência pneumática (Torres, 2015), Tab. 5.5. Com o objetivo de sintetizar este documento, serão mostradas as análises hidrodinâmicas e aerodinâmicas apenas para o caso de incidência de onda com $H = 1,5$ m e $T = 10$ s, que é o com maior porcentagem de potência.

Tabela 5.5 – Relações características da turbina (k_t) utilizadas nas simulações com Fluent.

H (m) \ T (s)	5	6	7	8	9	10	11	12
0.5	65	75	85	95	105	115	130	
1.0	65	75	85	95	105	115	130	155
1.5	65	75	85	95	105	115	130	155
2.0		75	85	95	105	115	130	155
2.5			85	95	105	115	130	155
3.0					105	115	130	155

Na Fig. 5.10 são mostradas as séries temporais de elevação de superfície livre nas sondas S1 e S2, que se encontram no início do canal de ondas, em uma profundidade de 14 m (ver Fig. 4.5). Percebe-se na sonda S1, que está localizada a 1 m do batedor, que as quatro primeiras ondas do registro possuem $H = 1,50$ m e $T = 10$ s, com amplitudes da crista e da cava iguais, que são características da onda linear imposta na condição de contorno. Após, o sinal de elevação de superfície livre na sonda S1 sofre interferências das reflexões das ondas incidentes na parede frontal e posterior da câmara, sendo registradas ondas com $H = 2,08$ m e $T = 10$ s, compostas pela superposição das ondas incidentes com as refletidas.

A absorção ativa no batedor possibilita a continuação da simulação mesmo após a interferência das ondas refletidas no batedor. Nota-se que os resultados de elevação de superfície livre são estabilizados após o $t = 115$ s. Isso significa que as ondas refletidas são harmônicas da

onda incidente. Por isso que apenas a H é modificada após a reflexão das ondas na parede frontal e posterior da câmara, enquanto que o T não é alterado.

Na sonda S2, localizada a $L/2$ do início do canal, é verificado o início da transformação das ondas lineares incidentes em ondas do tipo segunda ordem de Stokes. No registro de elevação de superfície livre, verifica-se que a amplitude da cava é diferente da amplitude da crista, ou seja, as cavas são mais achatadas e as cristas mais pontiagudas nas quatro primeiras ondas. De maneira análoga ao comportamento da elevação da superfície livre na sonda S1, após os primeiros registros de ondas, existe a superposição das ondas incidentes com as ondas refletidas.

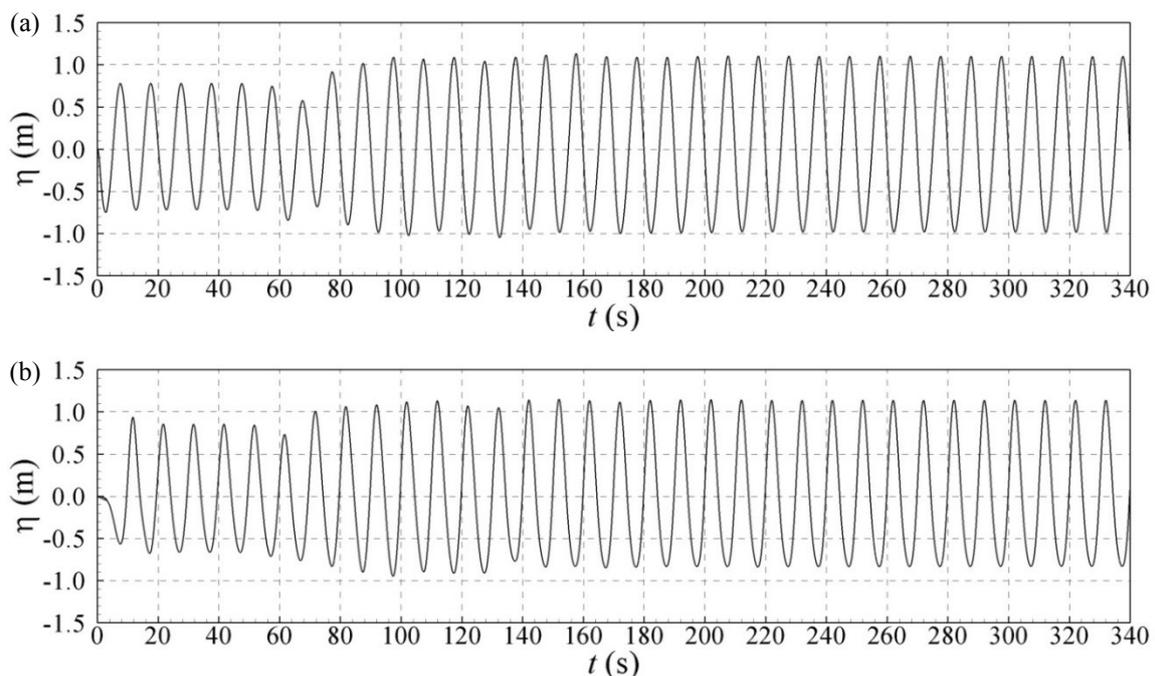


Figura 5.10 – Séries temporais de elevação de superfície livre nas sondas de monitoramento (a) S1 e (b) S2.

Na Fig. 5.11 são mostradas as séries temporais de elevação de superfície livre nas sondas S3, S4, S5 e S6, localizadas na berma de equilíbrio. Como estas sondas estão localizadas próximas do final do domínio (ver Fig. 4.5) não é possível fazer a análise antes e depois da reflexão. Entretanto, percebe-se, através do registro da elevação da superfície livre, um comportamento bem diferente entre as sondas de monitoramento, embora a distância entre elas seja de apenas 10 m.

Na sonda S3, início da berma de equilíbrio, as ondas possuem cavas achatadas e cristas pontiagudas, forma característica de ondas de amplitude finita do tipo Stokes. Vale lembrar que as ondas sofrem também interferência da reflexão das paredes frontal e posterior da câmara. O registro mostra ondas com $H = 2,08$ m e $T = 10$ s. Por outro lado, na sonda S4, o comportamento da elevação de superfície livre é totalmente diferente. Essa diferença se dá em parte pela berma que

modifica a onda e, principalmente, pela reflexão. Na sonda S4 são verificadas ondas com $H = 1,99$ m e $T = 10$ s, com amplitudes semelhantes.

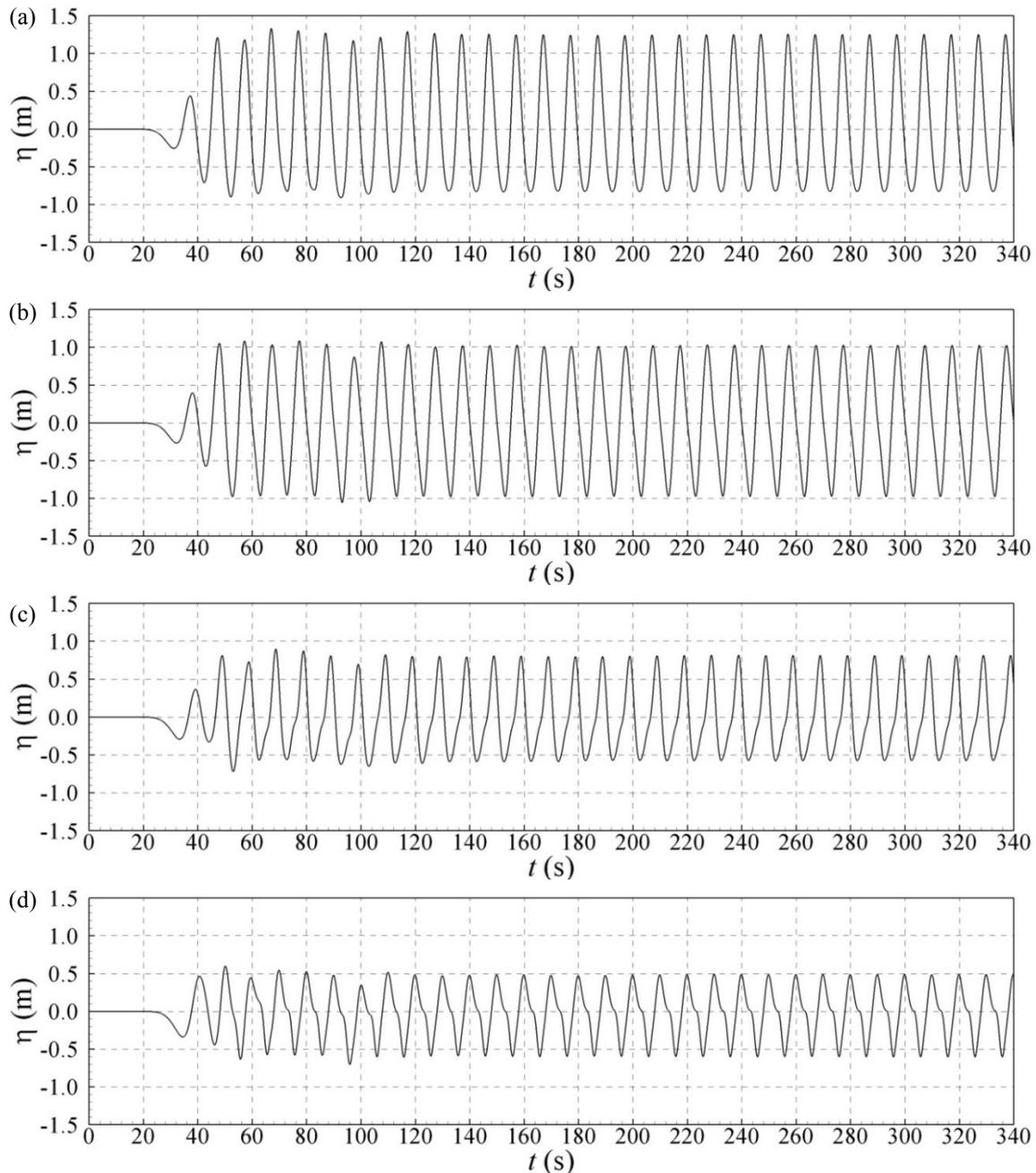


Figura 5.11 – Séries temporais de elevação de superfície livre nas sondas de monitoramento (a) S3, (b) S4, (c) S5 e (d) S6.

Na sonda S5, situada a 10 m antes do final da berma, verifica-se um registro de elevação de superfície livre extremamente modificado pelas transformações ocorridas na berma de equilíbrio e pela reflexão das ondas nas paredes frontal e posterior da câmara. Nessa sonda, as ondas possuem $H = 1,39$ m e $T = 10$ s. Na sonda S6, situada no final da berma de equilíbrio, embora o

comportamento da elevação da superfície livre seja extremamente diferente dos registrados nas demais sondas, as razões para esse comportamento são as mesmas: transformações (empolamento) da onda na berma de equilíbrio e reflexão causada pelas paredes frontal e posterior. Nessa sonda, são registradas ondas com $H = 1,08$ m e $T = 10$ s.

De maneira geral, é notado que, nas sondas S3 e S4, as reflexões causadas pelas paredes frontal e posterior da câmara causam um aumento da onda registrada nas sondas em relação a incidente. Por outro lado, nas sondas S5 e S6 as reflexões causam uma diminuição das ondas registradas nas sondas em relação a incidente. Isso se deve à diferença de fase entre a onda progressiva e a regressiva no local de medição.

Na Fig. 5.12 é mostrada a série temporal de elevação de superfície livre na sonda S7, localizada próximo à parede frontal da câmara (Ver Fig. 4.5). Percebe-se que, junto à parede frontal, as ondas possuem $H = 2,21$ m e $T = 10$ s e a amplitude das ondas são bem maiores na crista do que na cava. Este comportamento se deve pela não linearidade das ondas e pela hidrodinâmica do escoamento causado pela abertura abaixo da linha d'água para a câmara. Como é nesse ponto que as ondas são refletidas, é formado um nó onde as amplitudes das ondas refletidas e das ondas incidentes são somadas, razão pela qual a H medida na sonda de monitoramento S7 é bem maior que a incidente. Devido à abertura abaixo da linha d'água, não ocorrem ondas totalmente estacionárias.

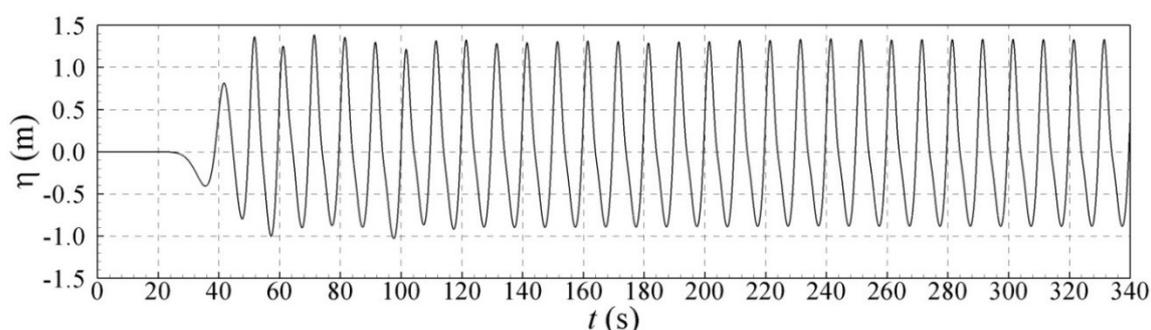


Figura 5.12 – Série temporal de elevação de superfície livre na sonda de monitoramento S7.

Na Fig. 5.13 são mostradas as séries temporais de elevação de superfície livre nas sondas S8, S9 e S10 que estão localizadas junto à parede frontal, junto à parede posterior e no meio da câmara, respectivamente (ver Fig. 4.5). De maneira geral, percebe-se que o comportamento da elevação da superfície livre é semelhante em todas as sondas localizadas dentro da câmara. Foram registradas ondas com $H = 1,60$ m, $H = 1,82$ m e $H = 1,71$ m nas sondas S8, S9 e S10, respectivamente. Esta pequena diferença de H entre as sondas de monitoramento dentro da câmara se deve ao fenômeno de *slosh*.

Percebe-se que as alturas das ondas dentro da câmara são levemente maiores que as alturas

das ondas incidentes. Tomando-se como referência a altura medida na sonda de monitoramento no centro da câmara, houve uma amplificação de 14 % da onda incidente. Porém, tem que ser levado em conta que para este caso foi utilizado uma turbina com relação característica $kt = 115 \text{ Pa s m}^{-3}$, que impõe resistência a passagem de ar e gera uma pressão dentro da câmara. Destarte, restringindo a elevação de superfície livre dentro da câmara.

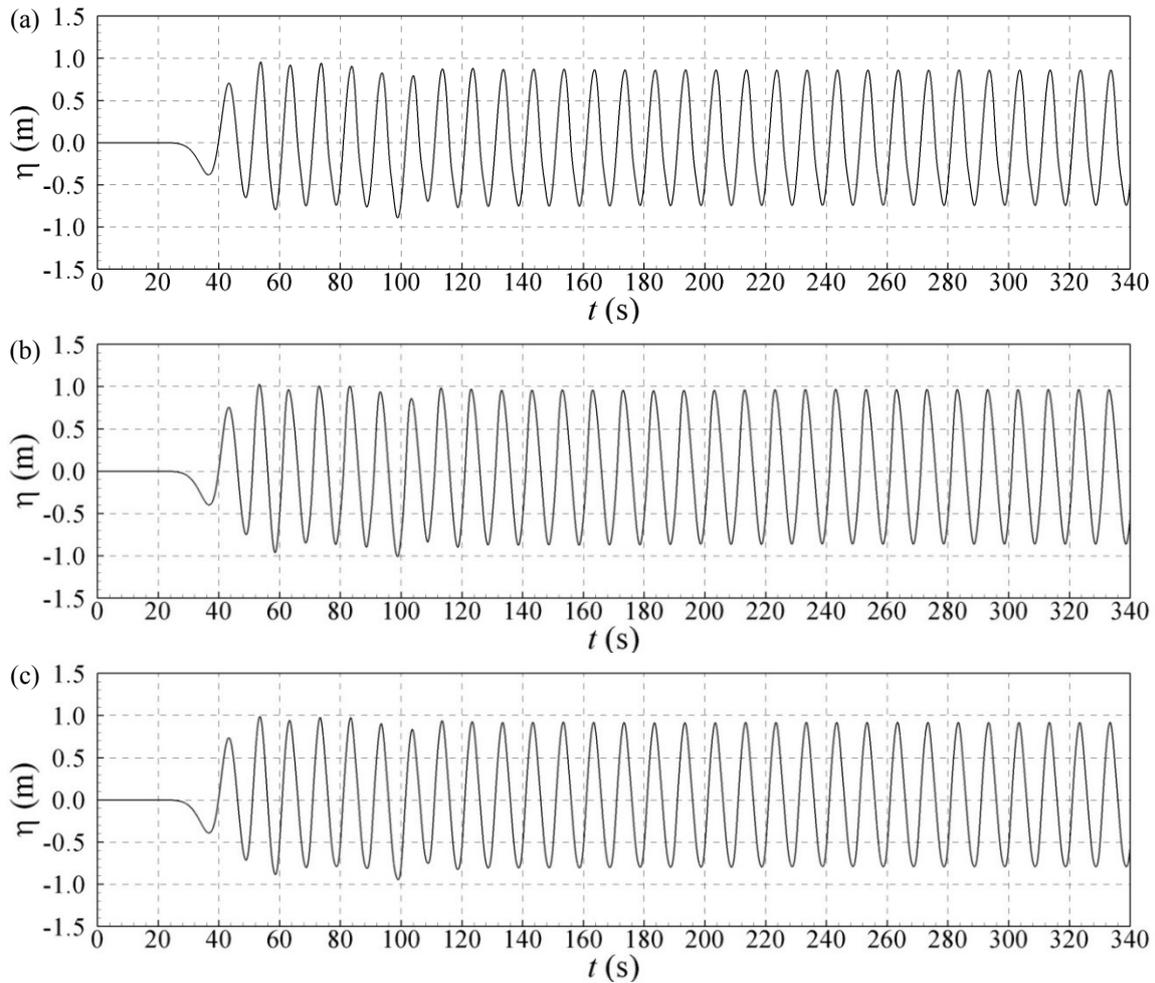


Figura 5.13 – Séries temporais de elevação de superfície livre nas sondas de monitoramento (a) S8, (b) S9 e (c) S10.

Na Fig. 5.14 é mostrada a sequência de dez instantes dentro de um período de onda com a magnitude da velocidade e as linhas de correntes para o caso com incidência de onda com $H = 1,50 \text{ m}$ e $T = 10 \text{ s}$. Percebe-se que as maiores velocidades ocorrem junto à parede vertical com magnitude máxima de $1,94 \text{ m/s}$; já as velocidades mais baixas ocorrem no fundo do canal e perto da parede posterior da câmara. As velocidades máximas são verificadas quando da passagem da crista e da cava da onda. Na passagem da crista, a velocidade é máxima com direção no sentido de propagação da onda; por outro lado, na passagem da cava, a velocidade é máxima no sentido

contrário a propagação da onda. Dentro da câmara, são notadas pequenas inclinações da elevação de superfície livre, evidenciando que o fenômeno de *slosh* é pequeno para este caso.

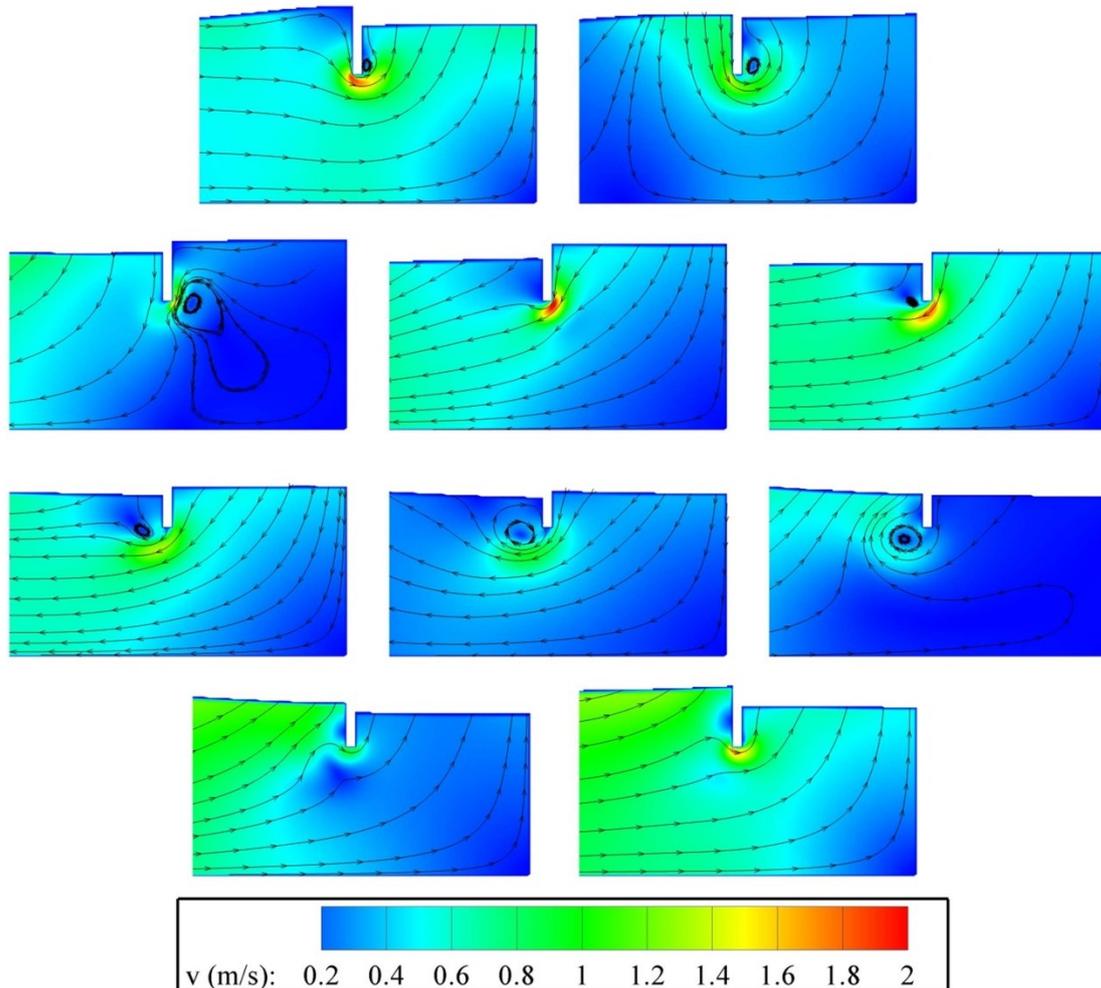


Figura 5.14 – Magnitude da velocidade e linhas de corrente em dez instantes dentro de um período de ondas para o caso de incidência de ondas com $H = 1,5$ m e $T = 10$ s.

Pelas linhas de correntes, verifica-se a formação de vórtices ao redor da parede frontal em dois instantes: desde a passagem da crista até o zero descendente e da passagem da cava até o zero ascendente. Também é notado que o escoamento possui o mesmo sentido da propagação da onda a partir do zero ascendente, passando pela crista (com maior magnitude da velocidade) até o zero descendente. A partir do zero descendente, o sentido do escoamento muda (fica contrário ao sentido de propagação da onda), com a maior magnitude da velocidade na passagem da cava e invertendo o sentido no zero ascendente, completando o ciclo.

Na Fig. 5.15, é mostrada a série temporal de pressão média medida na sonda de monitoramento S11, localizada no topo da câmara (ver Fig. 4.5). O fator que rege o comportamento da pressão e da elevação de superfície livre dentro da câmara é a relação característica da turbina.

Quanto maior esse parâmetro, maior a pressão e menor a elevação da superfície livre dentro da câmara. Com a série temporal de pressão média no topo da câmara obtida através do modelo Fluent, o modelo proposto por Torres (2015) é aferido para este caso de incidência de ondas. Com isso, é possível determinar a potência mecânica para turbinas similares com diferentes diâmetros (D) e velocidades de rotação (ω). Nesse trabalho foram consideradas turbinas com diâmetros de 1,50 m a 2,75 m e intervalo de 0,25 m entre os diâmetros e velocidades de rotação entre 50 % e 100 % de sua máxima velocidade periférica (150 m/s), com variações de 5 %.

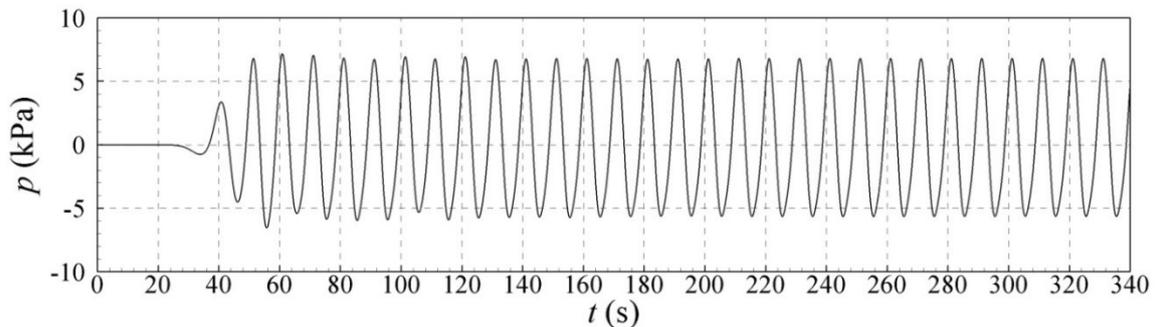


Figura 5.15 – Série temporal de pressão média na sonda de monitoramento S11.

Na Fig. 5.16 são mostradas as curvas de potências obtidas através das simulações do modelo Expedito para o caso com incidência de ondas com $H = 1,50$ m e $T = 10$ s. As curvas com linha sólida representam as curvas de potência sem o sistema de controle de pressão e, as curvas com linha tracejada representam as curvas de potência com o sistema de controle de pressão dentro da câmara. Percebe-se que a melhor performance da CAO nesse caso foi para a turbina com $D = 2,00$ m e $\omega = 150$ rad/s, gerando uma potência mecânica $P_m = 126,80$ kW. Para esta onda incidente, a potência disponível é de $P_w = 220,80$ kW, considerando 10 m de frente de onda (largura da câmara). Então, a eficiência da CAO para esse caso atinge valor máximo de 57,42 %.

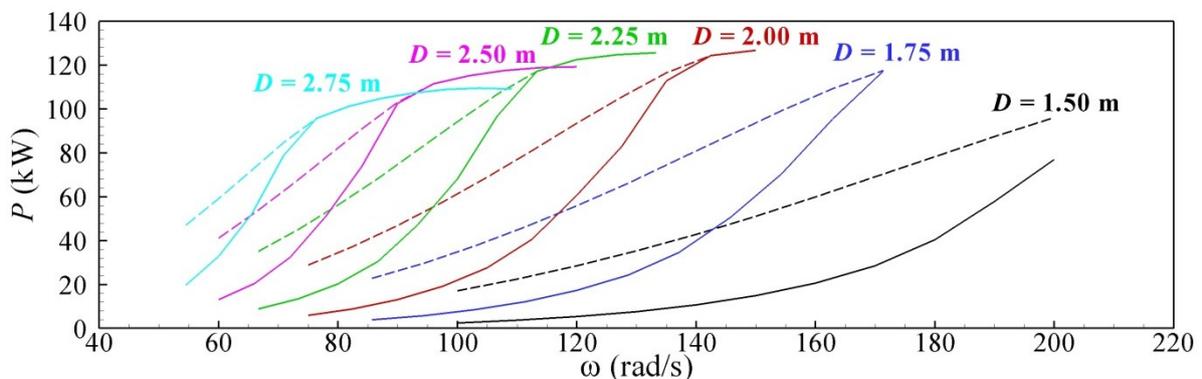


Figura 5.16 – Curvas de potência mecânica gerada pela CAO no caso de incidência de ondas com $H = 1,50$ m e $T = 10$ s, para diversos diâmetros (D) e velocidades de rotação (ω) – linha sólida sem o sistema de controle de pressão e linha tracejada com o sistema de controle de pressão.

Para as turbinas com $D = 1,50$ e $1,75$ m, o sistema de controle de pressão dentro da câmara aumenta a potência mecânica gerada pela CAO em todas as ω . Já nas turbinas com $D = 2,00$ a $2,75$ m, o sistema também aumenta a potência mecânica gerada pela CAO, porém nas ω mais elevadas tal sistema torna-se inoperante para este caso de incidência. Entretanto, como a ω é constante por um determinado período de tempo e as condições ondulatórias podem mudar nesse período, o sistema de controle de pressão torna-se extremamente necessário.

As potências máximas obtidas com os diferentes tamanhos de turbina para este caso de incidência de onda são semelhantes, com exceção do $D = 1,50$ m onde a potência gerada pela CAO é significativamente menor que nos outros casos. De forma análoga foram obtidas as potências mecânicas máximas para os outros 39 casos de incidência de ondas. Na Tab. 5.6 são apresentadas as máximas potências obtidas, com sistema de controle de pressão dentro da câmara.

Nesta tabela são mostradas as ocorrências das ondas por faixa de H e T obtidas através da avaliação do potencial energético local, a potência mecânica gerada pela CAO em cada caso de incidência de onda com os tamanhos de turbina avaliados e, a potência média mecânica anual gerada pela CAO. Nas colunas da potência mecânica é mostrado um círculo representando os melhores e os piores desempenhos da turbina para a condição ondulatória incidente, sendo que os círculos totalmente preenchidos representam os melhores desempenhos e os círculos sem preenchimento representam os piores desempenhos.

De maneira geral, percebe-se que para as ondas incidentes com menores alturas, o desempenho das turbinas com menores diâmetros possuem melhores desempenhos. Por outro lado, as ondas incidentes com maiores alturas, o desempenho das turbinas com maiores diâmetros possuem melhores desempenhos. Da mesma forma que para as ondas com alturas intermediárias, o desempenho das turbinas com tamanhos intermediários possuem melhores desempenhos. Com isso, verifica-se que o diâmetro ótimo da turbina é diretamente proporcional a altura da onda incidente.

Embora o diâmetro da turbina que possui melhor desempenho esteja vinculado, basicamente, a altura da onda, verifica-se que o período da onda também é importante na escolha da turbina. Para ondas com mesma altura, o diâmetro da turbina ótimo é maior quanto menor o período da onda, ou seja, diâmetro ótimo é inversamente proporcional ao período da onda. Essa análise mostra a importância do conhecimento das ondas características do local de implementação da CAO para a escolha do tamanho ótimo de sua turbina.

Na Tab. 5.6 também é mostrada a potência mecânica média anual obtida através da multiplicação da ocorrência das ondas características do local pela potência mecânica gerada por elas. Com o objetivo de entender o comportamento da potência mecânica média anual em função do

diâmetro da turbina, na Fig. 5.17 é mostrado a potência mecânica média anual por diâmetro de turbina. O tamanho ótimo da turbina para a câmara previamente definida e as condições ondulatórias locais é $D_{ótimo} = 2,25$ m e a potência mecânica média anual gerada é de $P_t = 36,48$ kW. No item 5.2 foi verificado que o potência media anual para o ponto de SJN foi de $P = 6,70$ kW/m de frente de onda e, como a câmara tem largura de 10 m, a potência disponível é de $P = 67,00$ kW. Desta maneira, a eficiência média da CAO é de 54,45 % com o tamanho de turbina ótimo.

Tabela 5.6 – Máximas potências mecânicas geradas pela CAO para diversos diâmetros de turbina e ondas incidentes e sua respectiva potência mecânica média anual.

Onda Incidente	Ocorrência	Potência Mecânica Gerada (kW)						Potência Mecânica Média Anual (kW)					
		1.50 m	1.75 m	2.00 m	2.25 m	2.50 m	2.75 m	1.50 m	1.75 m	2.00 m	2.25 m	2.50 m	2.75 m
$H = 0.5$ m $T = 5$ s	0.1684	4.58	4.75	4.53	3.99	3.39	2.56	0.77	0.80	0.76	0.67	0.57	0.43
$H = 0.5$ m $T = 6$ s	0.1289	9.42	9.95	9.76	9.01	9.01	6.65	1.21	1.28	1.26	1.16	1.16	0.86
$H = 0.5$ m $T = 7$ s	0.0746	12.26	12.78	12.37	11.43	10.08	8.56	0.91	0.95	0.92	0.85	0.75	0.64
$H = 0.5$ m $T = 8$ s	0.0399	13.73	14.04	13.40	12.08	10.55	8.89	0.55	0.56	0.53	0.48	0.42	0.35
$H = 0.5$ m $T = 9$ s	0.0158	14.55	14.56	13.60	12.08	10.31	8.61	0.23	0.23	0.22	0.19	0.16	0.14
$H = 0.5$ m $T = 10$ s	0.0048	15.08	14.84	13.60	11.89	10.04	8.23	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04
$H = 0.5$ m $T = 11$ s	0.0007	15.49	14.95	13.49	11.60	9.67	7.81	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$H = 1.0$ m $T = 5$ s	0.1073	15.72	17.89	18.83	18.70	17.79	16.45	1.69	1.92	2.02	2.01	1.91	1.77
$H = 1.0$ m $T = 6$ s	0.0717	29.86	34.34	36.30	36.31	34.87	32.29	2.14	2.46	2.60	2.60	2.50	2.32
$H = 1.0$ m $T = 7$ s	0.0333	40.10	45.25	47.47	46.97	44.62	41.07	1.34	1.51	1.58	1.56	1.49	1.37
$H = 1.0$ m $T = 8$ s	0.0381	46.70	51.93	53.59	52.28	49.06	44.47	1.78	1.98	2.04	1.99	1.87	1.69
$H = 1.0$ m $T = 9$ s	0.0489	50.95	55.87	56.60	54.48	50.26	44.98	2.49	2.73	2.77	2.66	2.46	2.20
$H = 1.0$ m $T = 10$ s	0.0338	54.58	58.62	58.59	55.49	50.53	44.61	1.84	1.98	1.98	1.87	1.71	1.51
$H = 1.0$ m $T = 11$ s	0.0091	57.52	60.98	59.97	56.13	50.40	43.94	0.52	0.56	0.55	0.51	0.46	0.40
$H = 1.0$ m $T = 12$ s	0.0007	59.65	62.18	60.37	55.69	49.35	42.54	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03
$H = 1.5$ m $T = 5$ s	0.0006	29.09	34.72	37.90	39.18	38.67	36.91	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
$H = 1.5$ m $T = 6$ s	0.0060	56.06	66.67	73.32	76.17	75.70	72.74	0.33	0.40	0.44	0.45	0.45	0.43
$H = 1.5$ m $T = 7$ s	0.0162	75.34	88.88	96.77	99.66	98.13	93.58	1.22	1.44	1.56	1.61	1.59	1.51
$H = 1.5$ m $T = 8$ s	0.0212	87.41	104.38	112.08	113.96	110.93	104.56	1.85	2.22	2.38	2.42	2.35	2.22
$H = 1.5$ m $T = 9$ s	0.0165	92.84	113.10	121.35	121.59	116.78	108.70	1.53	1.86	2.00	2.00	1.92	1.79
$H = 1.5$ m $T = 10$ s	0.0270	96.12	117.65	126.80	125.64	119.36	109.60	2.60	3.18	3.42	3.39	3.22	2.96
$H = 1.5$ m $T = 11$ s	0.0186	99.12	121.78	132.70	130.36	122.75	111.47	1.85	2.27	2.47	2.43	2.29	2.08
$H = 1.5$ m $T = 12$ s	0.0035	100.44	123.09	133.64	129.90	121.06	108.75	0.35	0.43	0.47	0.46	0.43	0.38
$H = 2.0$ m $T = 6$ s	0.0001	84.26	103.13	116.48	123.82	125.94	123.71	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$H = 2.0$ m $T = 7$ s	0.0008	99.50	127.28	151.41	163.32	165.03	160.95	0.08	0.10	0.12	0.13	0.14	0.13
$H = 2.0$ m $T = 8$ s	0.0046	106.50	137.15	165.59	186.24	189.28	183.49	0.49	0.63	0.77	0.86	0.87	0.85
$H = 2.0$ m $T = 9$ s	0.0071	109.91	141.58	171.27	194.07	198.47	190.81	0.78	1.01	1.22	1.38	1.41	1.36
$H = 2.0$ m $T = 10$ s	0.0053	112.41	144.74	175.17	198.96	204.64	195.28	0.60	0.77	0.94	1.06	1.09	1.04
$H = 2.0$ m $T = 11$ s	0.0076	114.71	147.73	178.97	203.92	211.87	201.10	0.87	1.12	1.35	1.54	1.60	1.52
$H = 2.0$ m $T = 12$ s	0.0026	115.55	148.46	179.31	203.34	208.95	196.54	0.30	0.38	0.46	0.52	0.54	0.50
$H = 2.5$ m $T = 7$ s	0.0001	110.96	145.07	179.29	210.47	233.29	236.78	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
$H = 2.5$ m $T = 8$ s	0.0002	116.59	152.82	189.77	224.73	253.69	268.22	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06
$H = 2.5$ m $T = 9$ s	0.0007	119.17	156.08	193.74	229.44	259.29	275.51	0.09	0.11	0.14	0.16	0.19	0.20
$H = 2.5$ m $T = 10$ s	0.0013	120.65	157.77	195.50	231.05	260.38	275.37	0.16	0.21	0.26	0.31	0.35	0.37
$H = 2.5$ m $T = 11$ s	0.0015	123.07	161.04	199.82	236.72	267.98	287.07	0.19	0.25	0.31	0.36	0.41	0.44
$H = 2.5$ m $T = 12$ s	0.0010	123.78	161.69	200.19	236.51	266.67	283.41	0.12	0.16	0.20	0.23	0.26	0.28
$H = 3.0$ m $T = 9$ s	0.0001	125.27	165.53	208.02	250.77	291.20	325.80	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03
$H = 3.0$ m $T = 10$ s	0.0005	126.27	166.56	208.91	251.22	290.82	323.95	0.06	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17
$H = 3.0$ m $T = 11$ s	0.0003	128.56	169.70	213.13	256.80	298.17	333.80	0.04	0.05	0.07	0.08	0.09	0.10
$H = 3.0$ m $T = 12$ s	0.0005	128.55	169.30	212.00	254.48	293.96	326.57	0.07	0.09	0.12	0.14	0.16	0.18
Soma	0.9200							29.25	33.94	36.25	36.48	35.19	32.39

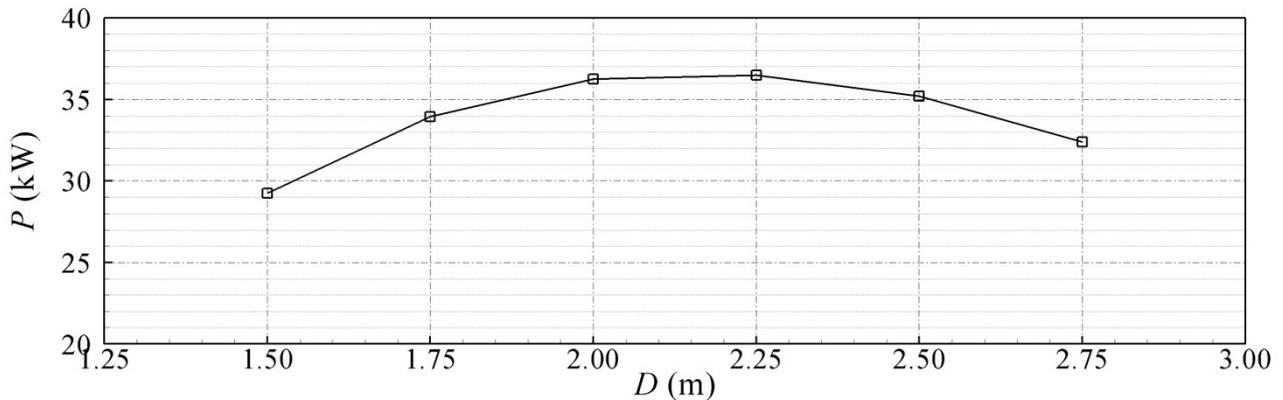


Figura 5.17 – Potência mecânica média anual gerada pela CAO com diversos tamanhos de turbinas.

No intuito de verificar a eficiência da CAO nas mais diversas situações de incidência de onda foi construída a Tab. 5.7. Percebe-se que a maior eficiência ocorre para as ondas incidentes com $H = 1,0$ m e $T = 7$ s com valores chegando a 68,39 %. Por outro lado, as piores eficiências ocorrem nas ondas maiores. Além do diâmetro ótimo da turbina, a eficiência da CAO está também associada com a geometria da câmara. Nesse trabalho, as dimensões da câmara utilizadas foram adotadas iguais as determinadas por Teixeira et al. (2013) em seu estudo de otimização para uma condição de mar presumida, com ondas incidentes com $H = 1, 0$ m e $T = 4 - 12$ s. Uma maneira de aumentar a eficiência do dispositivo seria um novo estudo da geometria da câmara, levando em conta as características ondulatórias do local de implementação do dispositivo.

Tabela 5.7 – Porcentagem de eficiência da CAO por faixa de H e T .

T (s) \ H (m)	5	6	7	8	9	10	11	12
0.50	32.53	61.22	66.57	61.56	54.72	48.47	42.99	-
1.00	38.12	61.68	68.39	66.60	61.69	56.55	52.00	47.30
1.50	35.49	57.50	64.49	64.52	61.19	56.91	53.68	49.03
2.00	-	52.58	59.45	59.32	54.94	50.69	47.23	43.17
2.50	-	-	49.03	45.81	41.57	37.68	35.09	32.14
3.00	-	-	-	-	31.55	28.45	26.44	24.01

Para avaliar a importância do sistema de controle de pressão dentro da câmara, foi calculada a relação entre a potência mecânica gerada pela CAO com o sistema de controle de pressão dentro da câmara e a potência sem o sistema de controle de pressão, Tab. 5.8. Verifica-se que o sistema de controle de pressão dentro da câmara só é utilizado nas ondas com $H \geq 2,0$ m, que possuem baixa ocorrência. Enquanto que a potência mecânica média anual gerada pela CAO levando em conta o sistema de controle de pressão foi de 36,48 kW, sem o sistema de controle de pressão foi de 35,72 kW, resultado numa diferença de apenas 2 %. Então, pode-se concluir que, quando bem

dimensionado o diâmetro da turbina, o sistema de controle de pressão, para a incidência de ondas monocromáticas, torna-se praticamente inoperante. Entretanto, vale ressaltar que, nesse trabalho, são consideradas apenas ondas monocromáticas; no mar real, onde existem ondas de várias alturas e períodos atuando simultaneamente, o sistema de controle de pressão pode ser essencial para um aumento significativo da eficiência da CAO.

Tabela 5.8 – Relação entre a potência mecânica gerada levando em conta os sistema de controle de pressão dentro da câmara e desconsiderando tal mecanismo.

T (s) \ H (m)	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00
0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.00	-	-	1.00	1.00	1.00	1.02	1.05	1.04
2.50	-	-	1.14	1.40	1.49	1.53	1.70	1.69
3.00	-	-	-	-	2.29	2.30	2.56	2.45

Admitindo que a potência gerada por um cluster de CAO's é dada pela simples multiplicação da potência gerada por uma CAO pelo número de dispositivos. Um cluster de CAO's com 20 câmaras acopladas em um quebra mar, por exemplo, gerariam 6,40 GW/ano de energia. Se tratando de uma estrutura mista com dupla função (abrigo e geração de energia) localizada em uma zona portuária com elevada demanda de energética, tal investimento pode ser viável.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo a avaliação numérica da potência das ondas absorvida por um dispositivo do tipo coluna de água oscilante instalado na costa sul do Brasil. Foi usado o modelo de propagação e geração de ondas espectrais Mike 21 SW, o qual foi aferido e validado na região de interesse, para reconstituir dez anos de agitação ondulatória e determinar o potencial energético local. Para a simulação hidrodinâmica e aerodinâmica do dispositivo do tipo CAO, foram utilizados os modelos Fluent e o modelo simplificado proposto por Torres (2015).

Na fase de aferição do modelo Mike 21 SW, foram realizadas cinco análises, avaliando diferentes situações de geração de ondas pelo vento local, dissipação por atrito no fundo e formulação temporal de propagação e geração de ondas. Os resultados simulados foram comparados com medições de curto período. Dentre as análises realizadas na fase de aferição do modelo, conclui-se que a Análise 3 foi a que apresentou melhores resultados. Tal análise utiliza a geração de ondas local através da ação do vento variando espacialmente e a formulação temporal não estacionária. Para a dissipação de atrito no fundo, adotou-se a metodologia que considera o coeficiente de rugosidade uma função do tamanho das formas de fundo determinado empiricamente, sendo que o grão mediano escolhido foi de $d_{50} = 0,0625$ mm.

As principais conclusões obtidas na fase de aferição do modelo são: (a) é de extrema importância à consideração da geração de ondas pelo vento local, mesmo que o domínio computacional limite a pista de atuação do vento; (b) devido à grande extensão e pequena declividade da plataforma continental brasileira do sul, é fundamental a aferição da dissipação por atrito no fundo; (c) não se verificou diferenças significativas entre as simulações no regime quase estacionário e não estacionário. Isso porque o tempo de residência das ondas no domínio computacional é menor que a mudança das condições de contorno.

Com o objetivo de analisar a qualidade da reprodução das condições ondulatórias obtidas através do modelo Mike 21 SW, foram comparados os valores de H_s , T_p e D_p simulados com os valores medidos entre os anos de 1996 a 1999 por um ondógrafo direcional fixado na profundidade de 15 m. Foi utilizado as características da Análise 3, a que apresentou melhores resultados na fase de aferição do modelo Mike 21 SW. Foi obtido um V_r de -0,030, -0,162 e -0,110 para H_s , T_p e D_p e um SI de 0,274, 0,302 e 0,257 para H_s , T_p e D_p , evidenciando que o modelo foi capaz de reproduzir as condições ondulatórias de longo período com qualidade satisfatória e mostrando que o modelo Mike 21 SW é uma excelente ferramenta para a reconstituição e previsão das condições

ondulatórias.

Foram reconstituídos 10 anos de agitação ondulatória (1997-2006) com o objetivo de avaliar e caracterizar o potencial energético no sul do Brasil em três pontos em águas intermediárias com 14 m de profundidade e um ponto offshore a 100 m de profundidade. Os fluxos médios anuais para os três pontos em águas intermediárias foram muito próximos, sendo que o maior (SJN) apresentou um valor de 6,7 kW/m, enquanto que em águas profundas o valor ficou em 22,3 kW/m. As principais razões para esta atenuação são a refração, pois as principais direções de incidência de ondas encontram-se oblíquas a direção normal à costa e a dissipação por atrito com o fundo, devido ao fato de que a plataforma brasileira do sul ser larga e de baixa inclinação. As variabilidades anuais, por estação e mensal dos fluxos de energia foram analisadas para a região, encontrando-se parâmetros de variabilidade (COV , MV e SV) favoráveis para águas profundas e moderados para águas intermediárias.

Uma análise direcional em águas profundas e intermediárias mostrou que as direções principais de incidência das ondas são de S e NE em águas profundas e de SSE e E em águas intermediárias. Devido à refração, as ondas em águas intermediárias tendem a ficarem mais próximas da direção normal à costa. Verificou-se que no verão e na primavera as direções principais de incidência são de NE e E, enquanto que no inverno e o outono são de S e SSE para águas profundas e intermediárias, respectivamente. Além disso, foi verificado que as ondas do quadrante S-E são mais energéticas que as ondas do quadrante N-E.

As análises de distribuições de H_s e T_e mostraram que, em águas intermediárias, existem duas faixas de H_s e T_e que ocorrem à concentração de energia: uma com $H_s = 1$ m e $T_e = 5$ s (maior ocorrência de ondas) e outra com $H_s = 2.0$ m e $T_e = 10$ s que, embora possua uma pequena ocorrência dessa condição ondulatória, a potência associada a ela é elevada, fazendo com que a potência equivalente anual seja semelhante à faixa de maior ocorrência.

O potencial em águas profundas é considerado bom em relação aos valores globais, o que torna esta região atrativa para a finalidade de extração de energia das ondas. Mesmo com as atenuações que ocorrem à medida que as ondas se propaguem para águas intermediárias, o potencial energético ainda merece atenção, uma vez que os custos de instalação, de manutenção e operação são menores em águas intermediárias. Além do mais, em estruturas mistas com dupla função: abrigo e geração de energia os custos de instalação de um conversor de energia podem se tornar justificáveis.

Para determinar a potência gerada por uma CAO instalada na região sul do Brasil, acoplada em um quebra mar na profundidade de 14 m, foram utilizados o modelo Fluent, do tipo RANS,

desenvolvido pela Ansys, e um modelo simplificado, baseado no modelo aerodinâmico de Josset e Clement (2007), desenvolvido por Torres (2015). Nas análises de desempenho do equipamento de conversão de energia, foi considerada a potência mecânica gerada pela turbina, levando em conta os sistemas de controle de rotação da turbina e de pressão dentro da câmara.

As ondas espectrais características da região foram transformadas em ondas monocromáticas com fluxo de energia equivalente para as simulações do dispositivo de conversão de energia das ondas. Foram obtidas 40 ondas monocromáticas equivalentes, as quais foram usadas para as simulações no modelo Fluent e os resultados obtidos de pressão no topo da câmara foram utilizados no modelo simplificado para a determinação da potência gerada por turbinas semelhantes do tipo Wells com diferentes diâmetros e velocidades de rotação.

Nesse trabalho foram avaliados seis diâmetros de turbinas ($D = 1,50 - 2,50$ m, com variações de 0,25 m) e onze velocidades de rotação ($\omega = 50 - 100$ %, com variações de 5%), sendo a velocidade periférica máxima admitida 150 m/s. Foi obtido um tamanho de turbina ótimo $D_{\text{ótimo}} = 2,25$ m e uma potência média anual de 36,48 kW. Verificou-se que a eficiência média da CAO com essa turbina e os mecanismos de controle de rotação da turbina e de controle de pressão dentro da câmara foi de 54,45 %. Entretanto, essa eficiência é variável de acordo com as características das ondas incidentes. A eficiência máxima foi de 68,39 % para as ondas com $H = 1,0$ m e $T = 7$ s e a eficiência mínima foi de 24,01 % para as ondas com $H = 3,0$ m e $T = 12$ s.

Foi notado que os sistemas de controle de pressão dentro da câmara, quando da determinação do diâmetro ótimo da turbina, não produzem uma mudança significativa da potência gerada pela CAO. Nesse trabalho, com a turbina ótima, a diferença entre os resultados com e sem o sistema de controle de pressão dentro da câmara foi de 2 %. Entretanto, tem que ser levado em conta as simplificações realizadas nesse trabalho considerando a incidência de ondas monocromáticas. As ondas reais variam ao longo do tempo em altura e período e, dessa maneira, o sistema de controle de pressão dentro da câmara poderia aumentar significativamente a potência mecânica gerada pelo equipamento de transformação de energia das ondas em energia elétrica.

Para concluir, a metodologia utilizada nesse trabalho pode ser aplicada em outras regiões com objetivo da determinação da potência gerada por um cluster de CAO's e para a otimização desses sítios de conversão de energia das ondas em energia elétrica. Foi verificado que para a otimização do tamanho ótimo da turbina é muito importante o conhecimento das condições ondulatórias locais, pois o tamanho ótimo da turbina varia de acordo com a onda incidente. Destarte, mostrando que a etapa da avaliação e caracterização do potencial energético é imprescindível para a otimização de equipamentos do tipo CAO.

7. TRABALHOS FUTUROS

De modo a complementar o presente trabalho, pretende-se, em trabalhos futuros, realizar o acoplamento do modelo de escala global com o modelo de escala local. Com isso, os erros devido à adoção de um espectro teórico na condição de contorno externa da simulação com o modelo Mike 21 SW seriam diminuídos. Além do mais, as variações da condição ondulatória ao longo dessa fronteira seriam contempladas com o acoplamento.

De maneira análoga ao realizado neste trabalho para a costa sul do Brasil, realizar a avaliação e caracterização do potencial energético para toda a costa do estado do Rio Grande do Sul, com o objetivo de encontrar pontos de concentração de energia. Assim, poderiam ser encontradas localizações com maiores potenciais energéticos para a instalação de um sítio de conversão de energia das ondas em energia elétrica.

Foi verificado que para a otimização do tamanho da turbina do tipo Wells, o conhecimento da condição ondulatória local é fundamental. Entretanto, a otimização das dimensões da câmara foi realizada com uma condição ondulatória presumida. Com o objetivo de aumentar a eficiência da coluna de água oscilante, um estudo das dimensões da câmara levando em conta a agitação marítima do local de instalação deveria ser realizado.

Por fim, com o objetivo de estudar a eficiência do equipamento em condições ondulatórias reais, em estudos futuros pretende-se implementar a incidência de ondas irregulares no Fluent para o estudo hidrodinâmico e aerodinâmico da coluna de água oscilante. Como as ondas irregulares variam em altura e período, o sistema de controle de pressão dentro da câmara pode tornar-se imprescindível para o caso de incidência de ondas irregulares na coluna de água oscilante.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, D. F., MELO F^o, E., ROMEU, M. A. R., FONTOURA, J. A. S., MENDES, W. G. Avaliação de Desempenho do Modelo WW3/NOAA para a Região de Rio Grande, RS. **X Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite – OMAR SAT**. P. 1- 4, 2013.
- ALONSO, R., SOLARI, S., TEIXEIRA, L. Wave Energy Resource Assessment in Uruguay. **Energy**, v. 93, p. 683 – 696, 2015. (DOI:10.1016/j.energy.2015.08.114)
- ANSYS. **Fluent Theory Guide**, 2015.
- APPENDINI, C. M., URBANO-LATORRE, C. P., FIGUEROA, B., DAGUA-PAZ, C. J., TORRES-FREYERMUTH, A., SALLES, P. Wave Energy Potential Assessment in the Caribbean Low Level Jet Using Wave Hindcast Information. **Applied Energy**, v. 137, p. 375 – 384, 2015. (DOI:10.1016/j.apenergy.2014.10.038)
- BARREIRO, T. G., GIL, L. Energia das ondas marítimas: tecnologia e experiência portuguesa. **Anais do Clube Militar Naval**, v. 138, p. 403 – 422, 2008.
- BESIO, G., MENTASCHI, L., MAZZINO, A. Wave Energy Resource Assessment in the Mediterranean Sea on the Basis of a 35-year Hindcast. **Energy**, v. 94, p. 50 – 63, 2016. (DOI:10.1016/j.energy.2015.10.044)
- BIDLOT, J., JANSSEN, P., ABDALLA, S. **A revised formulation of ocean wave dissipation and its model impact**. Technical Report Memorandum 509, ECMWF, 2007.
- CALLIARI, L. J., WINTERWERP, J. C., FERNANDES, E., CUCHIARA, D., VINZON, S. B., SPERLE, M., HOLLAND, K. T. Fine sediment transport and deposition in the Patos Lagoon – Cassino beach sedimentary system. **Continental Shelf Research**, v. 29, p. 515 – 529, 2009.
- CAMARGO, O. A., SILVA, F. J L., CUSTODIO, R. S., GRAVINO, N. **Atlas eólico do Rio Grande do Sul**. Departamento de Minas, Energia e Comunicação, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, p. 70, 2002.
- CLÉMENT, A., MCCULLEN, P., FALCÃO, A., FIORENTINO, A., GARDNER, F., HAMMARLUND, K., LEMONIS, G., LEWIS, T., NIELSEN, K., PETRONCINI, S., PONTES, M.T., SCHILD, P., SJÖSTRÖM, B.O., SØRENSEN, H.C., THORPE, T. Wave Energy in Europe: Current Status and Perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, p. 405 – 431, 2002.
- CORNETT, A. M. A global wave energy resource assessment. **Proceedings of the ISOPE 2008 18th International Offshore and Polar Engineering Conference**, P. 318 – 326, 2008.
- COUNT, B., FRY, R., HASKELL, J. **An Experimental Investigation of the Harbor Concept in Wave Energy**. CEGB, Technology Planning and Research Division, Marchwood Engineering Laboratories, 1983.

- CUCHIARA, D. C., FERNANDES, E. H., STRAUCH, J. C., WINTERWERP, J. C., CALLIARI, L. J. Determination of the wave climate for the southern Brazilian shelf. **Continental Shelf Research**, v. 29, p. 545 – 555, 2009. (DOI:10.1016/j.csr.2008.09.025)
- DEAN, R., DALRYMPLE, R. A. **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists**, World Scientific Publishing, 1991. (Advanced Series on Ocean Engineering, 2).
- DIDIER, E., NEVES, M.G. A Semi-Infinite Numerical Wave Flume using Smoothed Particle Hydrodynamics. **In: Proceeding of International Journal of Offshore and Polar Engineering**, v. 22, n. 3, p. 193-199, 2012.
- DIDIER E., PAIXÃO CONDE, J. M., TEIXEIRA, P. R. F. Simulação numérica 3D de um modelo de dispositivo de aproveitamento da energia das ondas (tipo coluna de água oscilante) em grande profundidade. **In: IV Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia**, ISBN 978-972-49-2234-8, Lisboa, Portugal, p. 10, 2012.
- DIDIER E., TEIXEIRA, P. R. F., NEVES, M. G. TANQUE DE ONDAS NUMÉRICO 3D PARA ESTUDOS DE ENGENHARIA COSTEIRA. **VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**, ISSN 2448-2951, Rio Grande, Brasil, p. 1 – 10, 2016.
- DHI. **Mike 21 Spectral Wave Module – User’s Guide**. 2014 a.
- DHI. **Mike 21 Spectral Wave Module – Scientific Documentation**. 2014 b.
- DHI. **Mike Zero Mesh Generator – Step-by-step training guide**, 2014 c.
- FALCÃO, A. F. O. Wave Energy Utilization : A Review of the Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 899 – 918, 2010. (DOI:10.1016/j.rser.2009.11.003)
- FALCÃO, A. F. O., JUSTINO, P. A. P. OWC wave energy device with air flow control. *Ocean Engineering*, v. 26, p. 1275 – 1295, 1999.
- FUNKE, E.R., MANSARD, E.P.D. **On the Synthesis of Realistic Sea States in a Laboratory Flume**. National Research Council of Canada, Hydraulics Laboratory, Tech. Rept., LTR-HY-66. 1979.
- GODA, Y. **Randon Seas and Design of Maritime Structures**, World Scientific Publishing, 2010. (Advanced Series on Ocean Engineering. v.15)
- GOLÇALVEZ, M., MARTINHO, P., SOARES, C. G. Assessment of wave energy in the Canary Island. **Renewable Energy**, v. 68, p. 774 – 784, 2014. (DOI:10.1016/j.renene.2014.03.017)
- GARRISON, T. **Oceanography: An Invitation to Marine Science**, Cengage Learning, 2009.
- GUILLOU, N. Evaluation of Wave Energy Potential in the Sea of Iroise with two Spectral Models. **Ocean Engineering**, v. 106, p. 141 – 151, 2015. (DOI:10.1016/j.oceaneng.2015.06.033)
- GUNN, K., STOCK-WILLIAMS, C. Quantifying the Global Wave Power Resource. **Renewable**

- Energy**, v. 44, p. 296 – 304, 2012. (DOI: 10.1016/j.renene.2012.01.101)
- HASSELMANN, K. On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 6, p. 107 – 127, 1974.
- HILES, C. E. **On the use of computational models for wave climate assessment in support of the wave energy industry**. Master of Mechanical Engineering Science Thesis, University of Victoria, 2010.
- HIGUERA, P., LARA, J. L., LOSADA, I. J. Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models applications to OpenFoam®. **Coastal Engineering**, v. 71, p. 102 – 118, 2013. (DOI: 10.1016/j.coastaleng.2012.07.002)
- HIRT, C. W., NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamic of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, p. 201 – 225, 1981. (DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- HOLLAND, K. T., VINZON, S. B., CALLIARI, L. J. A field study of coastal dynamics on a muddy coast offshore of Cassino beach, Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 29, p. 503 – 514, 2009. (DOI:10.1016/j.csr.2008.09.023)
- HOLTHUIJSEN, L. H. **Waves in Oceanic and Coastal Waters**, Cambridge University Press. 2007.
- JADIDOLESLAM, N., OZGER, M., AGIRALIOGLU, N. Wave power potential assessment of Aegean Sea with an integrated 15-year data. **Renewable Energy**, v. 86, p. 1045 – 1059, 2016. (DOI:10.1016/j.renene.2015.09.022)
- JOSSET, C., CLÉMENT, A. H. A time domain numerical simulator for oscillating water column power plants. **Renewable Energy**, v. 32, p. 1379 – 1402, 2007.
- KAMRANZAD, B., ETERNAD-SHAHIDI, A., CHEGINI, V. Sustainability of wave energy resources in southern Caspian Sea. **Energy**, v. 97, p. 549 – 559, 2016. (DOI:10.1016/j.energy.2015.11.063)
- KOMEN, G. J., HASSELMAN, S., HASSELMAN, K. On the existence of fully developed wind-sea spectrum. **Journal of Physical Oceanography**, v.14, p. 1271 – 1285, 1984. (DOI:10.1175/1520-0485(1984)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2)
- LARA, J.L., RUJU, A., LOSADA, I.J. Reynolds averaged Navier-Stokes modelling of long waves induced by transient wave group on a beach. **In: Proceedings of Royalty Society A**, v. 467, p. 1215-1242, 2010.
- LAUNDER, B. E., SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 3, p. 269 – 289, 1974.
- LIBERTI, L., CARILLO, A., SANNINO, G. Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective. **Renewable Energy**, v. 50, p. 938 – 949, 2013. (DOI:10.1016/j.renene.2012.08.023)

- LIU, P. L. F.; LOSADA, I. J. Wave propagation modeling in coastal engineering. **Journal of Hydraulic Research**. v.40, n.3, p.229-240, 2002.
- LIU, Z., SHI, H., HYUN, B. S. Practical design and investigation of the breakwater OWC facility in China. **Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference**. P. 304 – 308, 2009.
- LÓPEZ, I., PEREIRAS, B., CASTRO, F., IGLESIAS, G. Optimization of turbine-induced damping for an OWC wave energy converter using RANS-VOF numerical model. **Applied Energy**, v. 127, p. 105 – 114, 2014. (DOI:10.1016/j.apenergy.2014.04.020)
- LÓPEZ, I., CASTRO, F., IGLESIAS, G. Hydrodynamics performance of an oscillating water column wave energy converter by means of particle imaging velocimetry. **Energy**, v. 83, p. 89 – 103, 2015. (DOI:10.1016/j.energy.2015.01.119)
- LÓPEZ, I., PEREIRAS, B., CASTRO, F., IGLESIAS, G. Holistic Performance Analysis and Turbine-Induced Damping for an OWC Wave Energy Converter. **Renewable Energy**, v. 85, p. 1115 – 1163, 2016. (DOI:10.1016/j.renene.2015.07.075)
- MARQUES, W. C., FERNANDES, E. H., MONTEIRO, I. O., MÖLLER, O. O. Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 29, p. 556 – 571, 2009. (DOI:10.1016/j.csr.2008.09.022)
- MEIRELLES, S., VINZON, S. B. Field observation of wave damping by fluid mud. **Marine Geology**, v. 376, p. 194 – 201, 2016. (DOI: 10.1016/j.margeo.2016.03.006)
- MELO F°, E. The Sea Sentinels Project: Watching Waves in Brazil. **Proceedings of Symposium on Coastal and Ocean Management (ASCE) – New Orleans**. P. 505 – 517, 1993.
- MELO F°, E. NOTA SOBRE O CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE ONDAS GERADAS PELO VENTO PARA USO EM CONVERSORES DE ENERGIA. V **Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**. P. 244 – 252, 2012.
- MØRK, G., BARSTOW, S., KABUTH., A, PONTES, M. T. Assessing the Global Wave Energy Potential. **Proceedings of OMAE 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. P. 447 – 454, 2010.
- MOLLER, O. O., LORENZZENTTI, J. A., STECH, J., MATH, M. M. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. **Continental Shelf Research**, v. 16, p. 335 – 351, 1996. (DOI:10.1016/0278-4343(95)00014-R)
- NBR 11682. **Estabilidade de Encostas**. ABNT, 2009.
- NIELSEN, P. **Some basic concepts of wave sediment transport**. Series paper 20, Institute of Hydrodynamic and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, 1979.
- PONTES, M.T., ATHANASSOULIS, G. A., BARSTOW, S., CAVALERI, L., HOLMES, B., MOLLISON, D., OLIVEIRA-PIRES, H. An Atlas of the Wave Energy Resource in Europe.

Proceedings of OMAE 1995 14th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering. P. 155-163, 1995.

RABASSA, C. M. **Monitoramento geotécnico da obra de ampliação dos molhes de Rio Grande, Brasil.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

ROMEU, M., FONTOURA, J., MELO, E. Typical Scenarios of Wave Regimes off Rio Grande do Sul, Southern Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 31, p. 61 – 68, 2015 . (DOI:10.2112/JCOASTRES-D-12-00085.1)

SCHÄFFER, H. AND KLOPMAN, G. Review of Multidirectional Active Wave Abortion Method. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 126, p. 88 – 97, 2000.

STRAUCH, J. C., CUCHIARA, D. C., TOLDO JÚNIO, E. E., ALMEIDA, L. E. S. B. O Padrão das Ondas de Verão e Outono no Litoral Sul e Norte do Rio Grande do Sul. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, p. 29 – 37, 2009.

SHENG, W., ALCORN, R., LEWIS, A. Assessment of primary energy conversions of oscillating water columns II. Power take-off and validations. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 6, 2014.

TEIXEIRA, P. R. F., DAVYT, D. P., DIDIER, E., RAMALHAIS, R. Numerical Simulation of an Oscillating Water Column Device Using a Code Based on Navier – Stokes Equations. **Energy**, v. 61, p. 513 – 530, 2013. (DOI:10.1016/j.energy.2013.08.062)

TOLMAN, H. L. **User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14.** Technical note, MMAB Contribution, 2009.

TORRES, F. R. **Método numérico simplificado para determinação das curvas de potência mecânica de turbina Wells instalada em dispositivo para a captação da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante sob incidência de ondas monocromáticas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, 2015.

TORRES, F. R., TEIXEIRA, P. R. F., DIDIER, E. Study of the turbine power output of an oscillating water column device by using a hydrodynamic – aerodynamic coupled model. **Ocean Engineering**. v. 125, p. 147 – 154, 2016. (DOI:10.1016/j.oceaneng.2016.08.014)

TOZZI, H.A.M. **Influência das tempestades extratropicais sobre o estoque subaéreo das praias entre Rio Grande e Chuí, RS. Campanha de outono e inverno de 1996.** Dissertação de Mestrado em Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

VAN DER WESTHUYSEN, A. J. **Nonstationary SWAN simulation in the Wadden Sea.** Final Report, WL| Delft Hydraulic, H4918.46, 2008.

VAN DOORMAL, J. P., RAITHBY, G. B. Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows. **Numerical Heat Transfer**, v. 7, p. 147 – 163, 1984.

- VAN LEER, B. Towards the ultimate conservation difference schemes. *Journal of Computational Physics*, v. 32, p. 101 – 136, 1979.
- VEIGAS, M., LÓPEZ, M., IGLESIAS, G. Assessing the Optimal Location for a Shoreline Wave Energy Converter. *Applied Energy*, v. 132, p. 404–411, 2014.(DOI:10.1016/j.apenergy.2014.07.067)
- VERSTEEG, H., MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**, Pearson, ed. 2, 2007.
- WEBER, S. L. Bottom friction for wind sea and swell in extreme depth-limited situations. **Journal of Physical Oceanography**, v. 21, p. 149 – 172, 1991. (DOI:10.1175/1520-0485(1991)021<0149:BFFWSA>2.0.CO;2)
- WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- WILCOX, D. C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. **AIAA journal**, v. 26, p. 1299 – 1310, 1988. (DOI:10.2514/3.10041)